Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu

Jyrki Pihlajamäki

Suulakepuristetun polystyreenilevyn soveltuvuus pehmeikölle perustetun kadun päällysrakenteeseen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.11.2012
Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu
Ohjaaja: DI Heikki Kangas

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu

Aalto-yliopisto, PL 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä Jyrki Pihlajamäki

Työn nimi Suulakepuristetun polystyreenilevyn soveltuvuus pehmeikölle perustetun kadun päällysrakenteeseen

Laitos Rakennustekniikan laitos

Professuuri Pohjarakennus ja maamekaniikka **Professuurikoodi** Rak-50

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) DI Heikki Kangas

Päivämäärä 30.11.2012 **Sivumäärä** 57+1 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Pehmeiköille rakennettujen katujen rakennekerrokset ovat usein nykyistä suunnittelukäytäntöä ohuemmat. InfraRYLin mukaisten paksujen rakennekerrosten rakentaminen lisää pohjamaan kuormitusta, jolloin pehmeillä pohjamailla katu painuu. Työssä tutkittiin ohuempaa vaihtoehtoista päällysrakennetta, jossa routaeristeenä ja osittaisena keventeenä käytettiin 100 mm paksua suulakepuristettua polystyreenilevyä (XPS). Työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko kadun päällysrakenteen ohjeellista paksuutta pienentää ilman että rakenteen kestoikä laskee merkittävästi.

Kirjallisuusselvityksessä perehdyttiin kadun rakenteisiin, niiden vaurioitumismekanismeihin sekä siihen, miten solumuovin käyttö vaikuttaa päällysrakenteen toimintaan. Tutkimusosiossa vaihtoehtoista rakennetta vertailtiin InfraRYLin mukaiseen rakenteeseen konsolidaatiopainuman, routamitoituksen sekä kuormituskestävyyden osalta. Konsolidaatiopainuma laskettiin vesipitoisuusmenetelmällä. Roudan tunkeutumissyvyys määritettiin talonrakennuksen routasuojausohjeiden mukaisesti ja routanousu laskettiin Tiehallinnon routaturpoama-kertoimeen perustuvalla menetelmällä. Kuormituskestävyysmitoitus tehtiin Odemarkin mitoitusyhtälöllä, analyyttisellä monikerrosmenetelmällä (APAS) sekä elementtimenetelmällä (PLAXIS 2D). Mitoitettava rakenne oli pehmeälle savelle perustettu katu, jossa liikennemäärät ovat enimmillään 2500 ajoneuvoa vuorokaudessa.

Kirjallisuusselvityksen ja laskelmien perusteella XPS soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin käytettäväksi katurakenteessa. Ohennetulla ja kevennetyllä XPS-rakenteella primaariset konsolidaatiopainumat olivat uudisrakentamisessa noin 45-50 % ja saneerauskohteessa noin 60-65% pienemmät kuin InfraRYLin mukaisella rakenteella.

Lisäksi 100 mm paksu XPS-levy estää pohjamaan jäätymisen, jolloin ei tapahdu routanousun aiheuttamia vaurioita tai sulamispehmenemisestä aiheutuvaa pohjamaan kantavuuden alenemista. Kuormituskestävyysmitoituksessa ohuemmalla XPS-rakenteella kriittisimmäksi osoittautui pohjamaan muodonmuutos. Muilta osin ei rakenteiden välillä ollut suuria eroja.

Vaikka laskennallisesti XPS-rakenteelle ei pystytty osoittamaan riittävää kestävyyttä, niin kirjallisuusselvityksen sekä tehtyjen laskelmien perusteella voidaan rakennetta suositella käytettäväksi saneerauskohteessa, jossa ohennetulla päällysrakenteella saadaan kuivakuorisaven ominaisuudet käytettyä hyödyksi. Ennen laajamittaista käyttöä rakenteen toimivuus varmistetaan koerakentamisella.

Avainsanat Katu, päällysrakenne, mitoitus, XPS, routasuojattu, kevennetty

Aalto University
School of Engineering

Aalto University, P.O. BOX 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Abstract of master's thesis

Author Jyrki Pihlajamäki

Title of thesis The suitability of extruded polystyrene board on street pavement structure founded on soft soil.

Department Civil and Structural Engineering

Professorship Soil Mechanics and Foundation Engineering **Code of professorship** Rak-50

Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc Heikki Kangas

Date 30.11.2012 **Number of pages** 57+1 **Language** Suomi

Abstract

Streets built on soft soils have often thinner pavement structure than specified in the current InfraRYL guidelines. Construction of a thicker pavement structure increases the load on the subgrade, in which case the street settle The aim of this thesis was to study the possibility of reducing the thickness of the pavement structure without a significant loss of durability in the structure. The objective was to evaluate an alternative thinner pavement structure, where a 100 mm thick extruded polystyrene board (XPS) was used to prevent frost heave and to reduce the weight of pavement structure.

The literature review concentrated on the street structures and damage mechanisms, as well as on how the usage of the XPS affects the performance of the pavement structure. In the research section, comparative calculations were made between the XPS and InfraRYL pavement structures. Consolidation settlements, frost heave, and bearing capacity were studied. The bearing capacity was calculated with Odemark's equation, analytical multi-layer method (APAS), and finite element method (PLAXIS 2D). The designed pavement structure is for a street, which is founded on soft clay, where traffic volumes are up to 2500 vehicles per day.

The results from the literature review and the calculations showed that the XPS is suitable for the pavement structure. The settlements were up to 65 % smaller with a structure that included XPS. Due to the insulation properties of the XPS, the unwanted damage due to frost heave does not occur.

According to the bearing capacity calculations, vertical strain in the subgrade was the most critical aspect on the XPS-structure. Otherwise, the structure deformations were quite similar with InfraRYL structure.

Although, according to the bearing capacity calculations the XPS structure could not meet the durability requirements, the literature review and the calculations indicated that the XPS structure can be recommended to be used in renovation, where dry crust clay properties can be utilized. Prior to a large scale use of the XPS structure, the performance of the structure has to be verified with a test pavement.

Keywords XPS, lightweight, pavement structure, dimensioning, frost heave,

Alkusanat

Diplomityö on tehty opinnäytetyönä FINNMAP-Infra Oy:ssä. Työn rahoitti Vantaan ja Espoon kaupungit sekä Finnfoam Oy. Työssä tutkittiin vaihtoehtoista ohuempaa päällysrakennetta.

Työn ohjausryhmään kuuluivat Heikki Kangas Vantaan kaupungilta, Matti Kaurila Espoon kaupungilta, Henri Nieminen ja Asso Erävuoma Finnfoam Oy:stä, Vesa Oksanen FINNMAP-Infra Oy:stä sekä Leena Korkiala-Tanttu Aalto-yliopistosta.

Aluksi kiitän kaikkia rahoittajia, jotka mahdollistivat työn tekemisen. Kiitän työn ohjaajaa DI Heikki Kangasta. Isot kiitokset kuuluvat työn valvojalle professori Leena Korkiala-Tantulle työn tarkastamisesta ja ohjaavista kommenteista koko työn aikana. Haluan kiittää koko ohjausryhmää rakentavista ja asiantuntevista kommenteista. Lisäksi haluan kiittää Vesa Oksasta geotekniikan opeista.

Erityiskiitokset haluan osoittaa isälleni Jari Pihlajamäelle työn toistuvasta oikolukemisesta ja yhdyssanojen korjaamisesta sekä perehdyttämisestä päällysrakenteen mitoitukseen.

Haluan myös kiittää äitiäni opiskelujen aikaisesta tuesta ja puolisoani Suvia kannustuksesta tämän työn aikana.

Lopuksi kiitän kaikkia kavereita, joiden kanssa tuli istuttua pitkiä päiviä Maarintalolla.

Espoo 30.11.2012

Jyrki Pihlajamäki

Sisällysluettelo

Merkinnät

E	kimmomoduuli [MPa]
E_A	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus [MPa]
E_{oed}	tangenttimoduuli [kN/m2]
E_P	mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus [MPa]
E_{ur}	kuorman vähennys- tai toistokuormitusvaiheen sekanttimoduuli [kN/m2]
E_{50}	sekanttimoduuli [kN/m2]
E_2	levykuormituskokeen toistokuormituksen kantavuusarvo [MPa]
K_0^{nc}	normaalikonsolidoituneen tilan lepopainekerroin [-]
N	kuormituskertojen lukumäärä [-]
a	levykuormituskokeen levyn säde, joka on tässä 0,15m
h	mitoitettavan kerroksen paksuus [m]
m	jännitysekspo nentti [-]
p_{ref}	referenssipaine [kPa]
u	huokosvedenpaine [kN/ m^2]
w	vesipitoisuus [%]
ε	suhteellinen muodonmuutos [-]
ε_e	suhteellinen kimmoinen muodonmuutos [µm/m]
ε_p	kumulatiivinen suhteellinen pysyvä muodonmuutos [µm/m]
τ'	maan tehokas leikkauslujuus [kN/m^2]
c'	maan tehokas koheesio [kN/m^2]
σ'	vallitseva tehokas normaalijännitys, [kN/m^2]
ϕ'	maan tehokas sisäinen kitkakulma [°]
σ	vallitseva normaalin suuntainen kokonaisjännitys [kN/m^2]
φ'	tehokas leikkauskestävyyskulma [º]
ν	Poissonin luku [-]
Ψ	dilataatiokulma [º]

Lyhenteet

AB	Asfalttibetoni
APAS	Analyyttinen päällysrakenteen suunnittelujärjestelmä
FEM	Finite Element Method
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2010
InfraRYL-rakenne	InfraRYLin mukainen kadun päällysrakenne katuluokassa 4 ja pohjamaaluokassa G, katso kuva 23, s. 31
KKL	Kuormituskertaluku
Log	Logaritminen
XPS	Suulakepuristettu polystyreeni
XPS-rakenne	Työssä tutkittu InfraRYL - rakenteelle vaihtoehtoinen ohuempi päällysrakenne, jossa on käytetty suulakepuristettua polystyreeniä, katso kuva 23, s. 31

1 Johdanto

Pehmeiköille rakennettujen katujen rakennekerrokset ovat usein nykyistä suunnittelukäytäntöä ohuemmat. InfraRYLin mukaisten paksujen rakennekerrosten rakentaminen lisää pohjamaan kuormitusta, jolloin pehmeillä pohjamailla katu painuu. Pohjanvahvistusten, kuten pilaristabiloinnin tekeminen olemassa oleville kapeille kaduille on hankalaa, johtuen mahdollisesta kunnallistekniikasta sekä liikenteestä. Painumien välttämiseksi kuormituksen lisäys pohjamaahan tulisi olla mahdollisimman pieni.

Työssä tutkittiin ohuempaa vaihtoehtoista päällysrakennetta, jossa routaeristeenä ja osittaisena keventeenä käytettiin 100 mm paksua suulakepuristettua polystyreenilevyä (XPS). Solumuovin käytöstä tie – ja katurakenteessa on saatu positiivisia kokemuksia niin Suomessa kuin ulkomaillakin.

Katujen rakennekerroksien mitoitus perustuu ensisijaisesti Odemarkin mitoitusyhtälöön sekä kokemusperäisesti määritettyihin tavoitekantavuuksiin. Solumuovia sisältävien rakenteiden mitoitus perinteiselle Odemarkin mitoitusyhtälöllä johtaa usein riittämättömiin kantavuusarvoihin, jolloin rakenteen kelpoisuutta ei voida tällä menetelmällä osoittaa.

Työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko kadun päällysrakenteen ohjeellista paksuutta pienentää ilman, että rakenteen kestoikä laskee merkittävästi. Kirjallisuusselvityksessä perehdyttiin kadun rakenteisiin, niiden vaurioitumismekanismeihin sekä siihen, miten solumuovin käyttö vaikuttaa päällysrakenteen toimintaan. Tutkimusosiossa vaihtoehtoista rakennetta vertailtiin InfraRYLin mukaiseen rakenteeseen konsolidaatiopainuman, routamitoituksen sekä kuormituskestävyyden osalta. Mitoitus rajattiin koskemaan ainoastaan yhtä alusrakennetyyppiä (G) sekä yhtä katuluokkaa (4). Eli mitoitettava rakenne on pehmeälle savelle perustettu katu, jossa liikennemäärät ovat enimmillään 2500 ajoneuvoa päivässä.

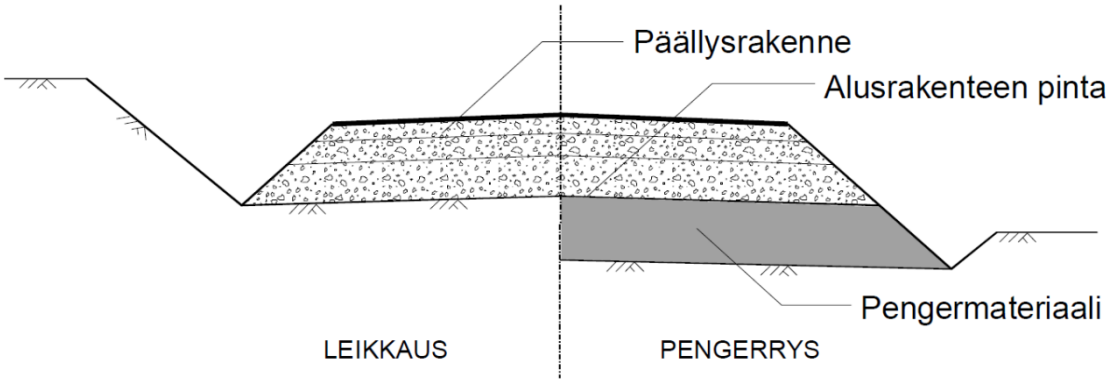
Konsolidaatiopainuma laskettiin Helenelundin vesipitoisuusmenetelmällä. Roudan tunkeutumissyvyys määritettiin talonrakennuksen routasuojausohjeiden mukaisesti ja routanousu laskettiin Tiehallinnon routaturpoama-kertoimeen perustuvalla menetelmällä. Kuormituskestävyysmitoitus tehtiin Odemarkin mitoitusyhtälöllä, analyyttisellä monikerrosmenetelmällä (APAS) sekä elementtimenetelmällä (PLAXIS 2D).

2 Kadun rakenne

2.1 Rakenteiden esittely

Kadun rakenteen tulee toimia kokonaisuutena niin, että se kestää liikenteen aiheuttamat kuormitus- ja kulumisrasitukset, lämpötilan vaihtelun aiheuttamat jännitykset, pohjamaan routimisesta johtuvia routanousuja sekä estää veden pääsyn rakenteisiin. (Ehrola 1996, s.135.)

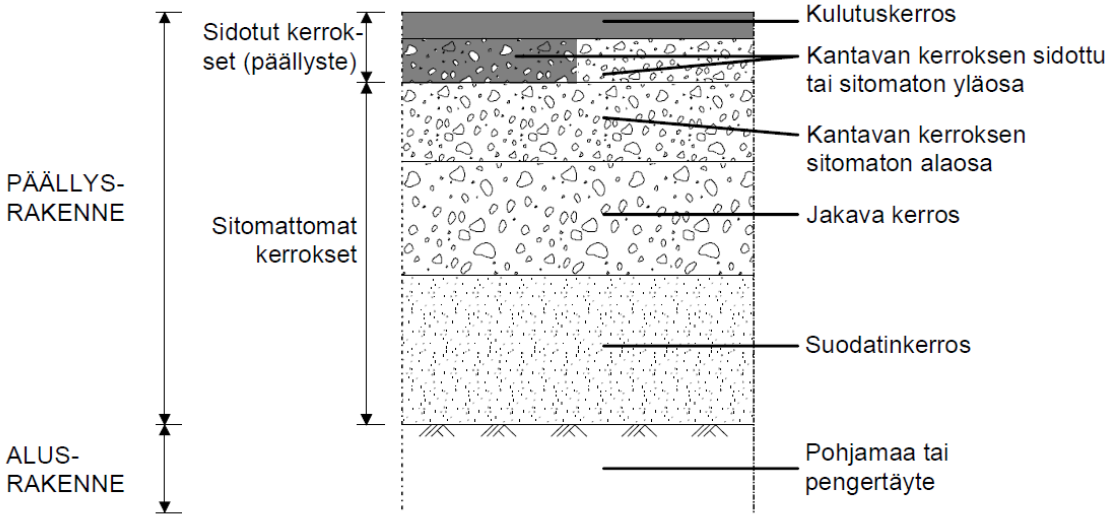
Kadun rakenne voidaan jakaa kuvan 1 mukaisesti syvyyssuunnassa kahteen päätasoon; alusrakenteeseen ja päällysrakenteeseen. Alusrakenne on päällysrakenteen alapuolella oleva penger tai jos katu on leikkauksessa niin pohjamaa. Alusrakenteen tehtävä on muodostaa päällysrakenteelle riittävän homogeeninen, kantava ja painumaton alusta. (Belt ym. 2002.)



Kuva 1. Kadun rakenne (Belt ym. 2002, s.11)

Päällysrakenteen tehtävä katurakenteessa on ottaa vastaan liikenteestä aiheutuvat kuormitukset ja jakaa ne tasaisesti alusrakenteelle riittävän laajalle alueelle. Päällysrakenteen tulee myös suojata alusrakennetta pakkasta vastaan estäen sen routimista. (Belt ym. 2002, s.11.)

Kaduilla käytetään yleensä kuvan 2 mukaista kerroksellista joustavaa päällysrakennetta, jossa päällimmäisenä on bitumilla sidottu kerros ja sen alapuolella sitomattomat kerrokset. Kaduilla voidaan käyttää myös muita päällysteitä, kuten kiveystä tai betonia. Tässä työssä keskitytään pelkästään bitumilla sidottuihin päällysteisiin.



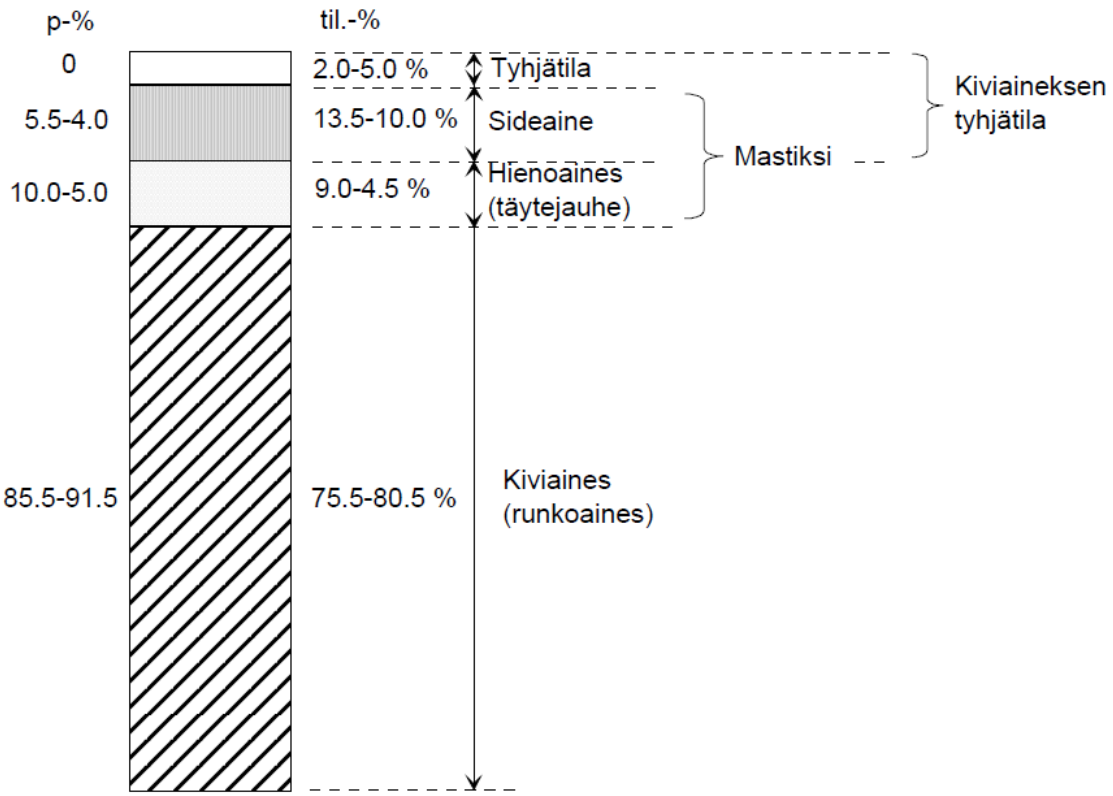
Kuva 2. Kadun päällysrakenne. (Belt ym.,2002, s.11)

2.2 Sidotut kerrokset

Sidotut kerrokset ovat päällysrakenteen ylimpiä kerroksia, joiden lujuus-, pitkäaikaiskestävyys- ja käytettävyysominaisuuksia on parannettu käyttäen sideainetta. Kaduilla ja teillä yleisimmin käytetty sideaine on bitumi tai sen johdannaiset.

Bitumi valmistetaan tislaamalla maaöljystä kevyet komponentit pois. Bitumin sideaineominaisuudet perustuvat sen viskositeetin lämpötilariippuvuuteen. Lämmitettäessä tarpeeksi kuumaksi, 120 ºC…200 ºC (PANK ry 2011, s.46), bitumi muuttuu juoksevaksi, jolloin se saadaan sekoitettua tasaisesti runkoaineen kanssa. Käyttölämpötilassa bitumi muuttuu niin jäykäksi, että se kestää liikenteen kuormitukset. Bitumilla sidotuista kerroksista käytetään yläkäsitettä asfaltti.

Kaduilla yleisesti käytetyt sidotut kerrokset ovat asfalttibetonia (AB). Asfalttibetonissa sideaineen eli bitumin osuus on noin 4…5,5 paino- %, mikä riittää antamaan kadulle asetetut toimivuus- ja kestävyysominaisuudet. Kuvassa 3 on esitetty asfalttibetonin koostumus ja komponentit. (PANK ry 2011)



Kuva 3. Asfalttibetonin koostumus ja komponentit. (PANK ry 2011)

Kaduilla sidotut kerrokset muodostuvat melkein kaikilla katuluokilla kahdesta asfalttibetonikerroksesta, kulutuskerroksesta ja sidekerroksesta. (InfraRYL 2010, s.528 - 533) Kulutuskerroksen ja sidekerroksen ero on muun muassa niiden runkoaineiden rakeisuuksissa ja runkoaineen laatuvaatimuksissa.

Kaduilla kulutuskerros tehdään asfalttibetonista AB 5…AB 22 riippuen halutun pinnan ominaisuuksista. Yleisesti kulutuskerroksen asfalttibetonina käytetään AB 16. Kulutuskerroksen meluominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä hienojakoisempaa runkoainesta tai melua vaimentavaa päällystettä. Sidekerroksen asfalttibetonina käytetään yleensä AB 16…AB 22. (PANK ry 2011)

2.3 Sitomattomat kerrokset

Sitomattomat kerrokset ovat päällysrakenteen kerroksia, joissa ei ole käytetty sideaineita. Sitomattomat kerrokset tehdään routimattomasta murskatusta tai luonnon materiaaleista. Materiaalien vaatimukset tiukkenevat päällysrakenteen pohjalta pintaa kohti. Sitomattomat kerrokset eivät voi ottaa vastaan vetorasituksia.

Kantavakerros

Kantavan kerroksen tehtävä on taata riittävän kantava, tiivis ja painumaton alusta sidotuille kerroksille. Kantavan kerroksen materiaalilla on kaikista korkeimmat laatuvaatimukset sitomattomista kerroksista. Kaduilla kantavan kerroksen materiaalina käytetään yleensä kalliomursketta. Kerrokseen voidaan käyttää rakeisuuksia 0/32, 0/40, 0/45, 0/56 ja 0/63. Yleisimmin käytetty rakeisuus on 0/45 mm. Kantavan kerroksen murskeelle on asetettu erilaisia vaatimuksia, kuten kiviaineksen iskunkestävyys ja erityisesti hienoainespitoisuus. (InfraRYL 2010, s.319)

Jakavakerros
Jakavan kerroksen materiaalivaatimukset ovat alhaisemmat kantavaan kerrokseen verrattuna. Jakavakerros voidaan tehdä kalliomurskeesta tai sorasta. Jakavan kerroksen suurin raekoko soralla on 200 mm ja murskeella 125 mm. Kuitenkin niin, että suurin sallittu raekoko on korkeintaan puolet kerralla tiivistettävän kerroksen paksuudesta. (InfraRYL 2010, s.304-305)

Suodatinkerros
Suodatinkerros estää päällysrakenteen ja pohjamaan materiaalien sekoittumisen sekä vähentää kapillaarisesti nouseva vettä. Suodatinkerros voidaan tehdä hiekasta tai vaihtoehtoisesti käyttää suodatinkangasta. InfraRYL 2010 mukaisissa katurakenteissa ei suodatinkerrosta ole vaan päällysrakenteen paksuutta kasvatetaan lisäämällä jakavan kerroksen paksuutta. Pohjamaan ja päällysrakenteen väliin asennetaan suodatinkangas kun on olemassa riski pohjamaan sekoittumisesta päällysrakenteeseen.

2.4 Pohjamaa

InfraRYL luokittelee taulukon 1 mukaisesti pohjamaan sen kantavuuden perusteella 7 luokkaan A:sta G:hen, G:n ollessa kantavuudeltaan heikoin. Kantavuudet ovat kevätkantavuuden arvoja. Muina vuodenaikoina kantavuudet voivat olla huomattavasti suurempia riippuen maalajista. Tätä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.4. Pohjamaaluokille määritetyt kantavuudet ovat Odemarkin mitoitusyhtälöön tarkoitettuja kantavuuden lähtöarvoja. On selvää, että ehjän kallion kimmomoduuli on huomattavasti suurempi kuin taulukossa 1 esitetty arvo. Taulukossa 2 on esitetty mihin pohjamaaluokkaan eri maalajit kuuluvat.

Taulukko 1. Pohjamaan kantavuusluokat ja niiden laskenta-arvot. (InfraRYL 2010)

Kantavuusluokka	Kantavuus
A	300 MN/m^2
B	200 MN/m^2
C	100 MN/m^2
D	50 MN/m^2
E	20 MN/m^2
F	10 MN/m^2
G	5 MN/m^2

Taulukko 2. Pohjamaan kantavuusluokitus. (InfraRYL 2010)

Maalaji	Tarkennus	Lyhennys	Luokka
Kallio	kallio	Ka	A
	louhe [1)]	Lo	
	murske [1)]	M	
Kivet [1)]		Ki	A
Sora		Sr	B
Soramoreeni	routimaton	rton SrMr	C
	routiva [2)]	SrMr	E (F)[4)]
Hiekka	routimaton karkea	rton kaHk	C
	routimaton keskik.	rton keHk	D
	routimaton hieno	rton hHk	D (E)[4)]
	routiva keskik.	keHk	E
	routiva hieno	hHk	E (F)[4)]
Hiekkamoreeni	routimaton	rton HkMr	D (E)[4)]
	routiva [2)]	HkMr	E (F)[4)]
Siltti		Si	F (G[4)], E[5)])
Silttimoreeni		SiMr	
Savi	kuivakuori (h ≥ 1 m)	kuivak. Sa	E
	sitkeä (Su ≥ 25 kN/m^2)[3)]	Sa	F (E)[5)]
	pehmeä (Su < 25 kN/m2)3)	Sa	G
Lieju		Lj	G
Turve		Tv	

Alusrakenteen kantavuus arvioidaan normaalisti pohjamaan maalajin perusteella. Jos pengertäytteen paksuus on vähintään 1 m, käytetään pengertäytteen kantavuusluokkaa. Jos pengertäytteen paksuus on alle 1 m, alusrakenteen kantavuus voidaan laskea, kun E-moduuliksi valitaan pengertäytteen kantavuusluokkaa vastaava kantavuus. Myös muut alusrakenteen pinnassa olevat varsinaista pohjamaata paremmin kantavat maakerrokset rinnastetaan tässä suhteessa pengertäytteeseen.

Huomautukset

1) Routiva murske sekä routivaa maata sisältävä louhe ja kivet rinnastetaan vastaavaan routivaan maalajiin.

2) Kantavuudeksi voidaan valita 35 MN/m^2, jos kyseessä on kuiva penger tai jos hienoainespitoisuus on enintään 20 % ja paikka ei ole märkä (ks. huomautus 4).

3) Siipikairauksella todettu suljettu leikkauslujuus.

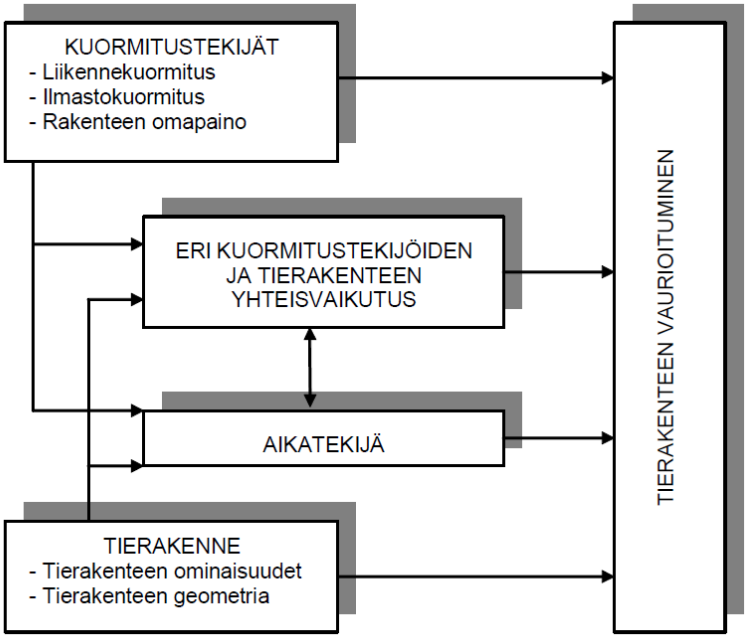
4) Suluissa olevaa kantavuusluokkaa käytetään, kun maa-aines on märkää lopullisessa alusrakenteessa eli pohjaveden etäisyys alusrakenteen pinnasta on alle 1 m tai paikkaan kerääntyy pintavesiä.

5) Penkereessä kuivana.

3 Katurakenteen vaurioituminen

3.1 Kuormitustekijät ja vauriomekanismit

Kadun rakennetta kuormittavat kuvan 4 mukaisesti liikenne, ilmasto sekä rakenteen omapaino. Kaduilla rakennetta vaurioitetaan paikallisesti myös johtojen ja putkien kunnossapitotehtävillä. Liikenteen sekä ilmaston kuormitus kohdistuu kadun päällysrakenteeseen kun taas rakenteen oma paino vaikuttaa negatiivisesti ainoastaan pehmeillä koheesio pohjamailla.



Kuva 4. Rappeutumismekanismit. (Belt ym. 2000, s.8)

Liikenne - ja ilmastokuormitukset eroavat toisistaan. Liikennekuormitus on dynaamista ja toistuvaa. Ilmaston aiheuttamat rasitukset ovat sääolosuhteista ja vuodenajoista riippuvaa kuormitusta, joka on liikennekuormitukseen verrattuna hidasta.

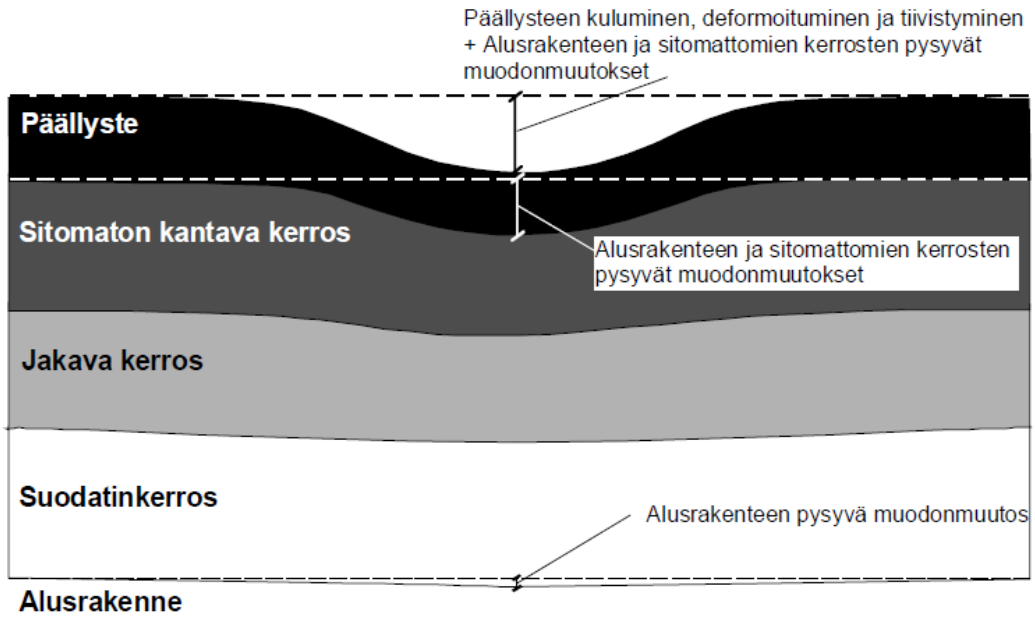
Liikenteestä aiheutuvat kuormitukset kadun rakenteeseen ovat pääasiassa raskaan liikenteen aiheuttamia. Henkilöautojen aiheuttamat rasitukset ovat nastarenkaista aiheutuvaa päällysteen kulumista. Ilmastokuormituksen tekijöitä ovat muun muassa lämpötilan vaihtelut, kosteus ja routa.

Kadun rakennetta tulee käsitellä yhtenä kokonaisuutena. Yhden rakenteen osan vaurioituminen vaikuttaa muiden rakenteen osien sekä koko rakenteen toimintaan. Vaurioiden syntyminen vaikuttaa rakenteen toimintaan siten, että sen vaurioituminen on itseään kiihdyttävä prosessi. (Belt ym. 2002.)

3.2 Urautuminen

3.2.1 Yleistä

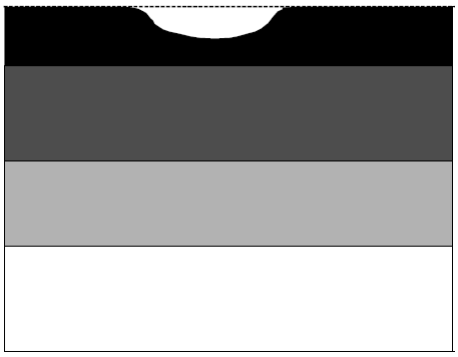
Urautuminen on kadun poikkisuuntaista epätasaisuutta. Urautumista aiheuttavat päällysteen kuluminen sekä päällys - ja alusrakenteen deformaatiot. Kuvassa 5 on havainnollistettu urautumisen osatekijöitä.



Kuva 5. Urautumisen osatekijät. (Belt ym. 2002, s.46)

3.2.2 Kuluminen

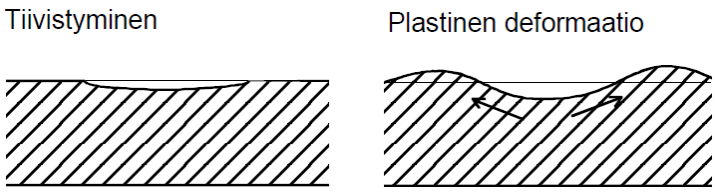
Päällysteen kuluminen aiheutuu pääasiassa nastarenkaiden käytöstä. Kulumiseen vaikuttavat liikennemäärä ja autojen massa, rengasprofiili sekä rengaspaine. Kaduilla nopeuden vaikutus on vähäinen, kuluminen voimistuu selvästi vasta yli 90 km/h nopeuksissa. Matalilla nopeuksilla nastan aiheuttama kuluminen johtuu pääasiassa nastan raapaistessa päällysteen pintaa. Korkeilla nopeuksilla kuluminen aiheutuu nastan iskusta päällysteen pintaan (Unhola 2004). Nastarenkaiden aiheuttama kuluminen on usein jyrkkäreunaista, kuva 6. Kulumista voidaan ehkäistä kulutuskerroksen materiaalivalinnoilla. Kulumiseen vaikuttavat tekijät ja sen ehkäiseminen ei ole tämän työn kannalta tärkeää, eikä sitä siksi käsitellä tässä enempää.



Kuva 6. Nastarenkaan aiheuttama kuluminen. (Belt ym., 2002, s.45)

3.2.3 Asfaltin plastiset deformaatiot ja tiivistyminen

Liikennekuormitus aiheuttaa kuvan 7 mukaisesti päällysteen tiivistymistä sekä plastisia eli pysyviä muodonmuutoksia. Pysyvien deformaatioiden suuruus riippuu liikennekuormasta ja sen nopeudesta sekä päällysteen ominaisuuksista ja lämpötilasta.



Kuva 7. Päällysteen pysyvät muodonmuutokset (Ehrola 1996, s.270)

Plastista deformaatiota tapahtuu erityisesti, kun päällystettä kuormitetaan raskaasti lämpimissä olosuhteissa pitkään eli alhaisilla nopeuksilla. Tämä selittyy asfaltin viskoelastisilla ominaisuuksilla. Viskoelastisuus tarkoittaa sitä, että materiaalin ominaisuudet riippuvat lämpötilasta ja kuormitusajasta.

3.2.4 Sitomattomien kerrosten deformaatiot

Sitomattomien kerrosten pysyvät deformaatiot riippuvat:

- liikennekuormituksen suuruudesta
- päällysteen paksuudesta ja jäykkyydestä
- sitomattomien kerrosten materiaaleista, tiiviydestä, hienoainespitoisuudesta, rakeisuusjakaumasta sekä kosteusolosuhteista
- pohjamaan kantavuudesta. (Belt ym. 2000, Laaksonen ym. 2004.)

Sitomattomissa kerroksissa tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia ja ne ovat hitaasti kehittyvässä tilassa koko rakenteen elinkaaren ajan. Sitomattomien kerrosten pysyville muodonmuutoksille löytyy kirjallisuudesta erilaisia malleja.

Muodonmuutoksia ennustetaan yleensä kimmoisen muodonmuutoksen ja kuormituskertojen lukumäärällä. Log - log asteikolla muodonmuutokset kehittyvät lähes lineaarisesti. Kaavassa 1 on esitetty tapa laskea sitomattomien kerrosten pysyvää muodonmuutosta. (Belt ym. 2000, s.43)

$$\varepsilon_p = a' \cdot \varepsilon_e \cdot N^b \qquad (1)$$

jossa,

ε_p	on kumulatiivinen suhteellinen pysyvä muodonmuutos µm/m
ε_e	on suhteellinen kimmoinen muodonmuutos µm/m
N	on kuormitusten lukumäärä (N-1 000)
a', b	on parametreja (Belt ym. 2000, s.43)

Parametrit a ja b ovat parametreja, jotka riippuvat käytettävän materiaalin lisäksi myös vallitsevista olosuhteista.

Sitomattomissa kerroksissa hienoainespitoisuuden lisääntyminen kasvattaa materiaalin kykyä sitoa kosteutta. Materiaalin vesipitoisuuden ollessa suuri, aiheuttaa liikennekuormitus huokosvedenpaineen äkillisen kasvun. Mikäli materiaalin vedenläpäisevyys on pieni, ei huokosvedenpaine pääse purkautumaan heti. Huokosvedenpaine pienentää maa partikkeleiden välisiä jännityksiä, mikä heikentää materiaalin kykyä ottaa vastaan kuormitusta, jolloin deformaatio kasvaa. Ongelma on suurin keväällä kun osa rakenteesta on vielä jäässä ja vesi ei pääse poistumaan rakennekerroksista. Kappaleessa 3.4 on käsitelty asiaa laajemmin.

3.2.5 Pohjamaan deformaatiot

Päällysrakenteen tarkoitus on jakaa liikennekuorman rasitukset riittävän laajalle alueelle, ettei pohjamaassa tapahdu pysyviä muodonmuutoksia. Mitä paksumpi päällysrakenne on, niin sitä pienemmät ovat liikennekuormituksesta aiheutuvat rasitukset pohjamaassa.

Pohjamaan kestävyyttä voidaan ennustaa mekanistisen mallin avulla lasketun pohjamaan pinnan pystymuodonmuutoksen avulla. Malleja kutsutaan pohjamaan kestoikäfunktioiksi. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia funktioita, joiden välillä on kuitenkin suuria eroja. Funktioissa on muuttujana usein pohjamaan pinnan pystymuodonmuutos ja kuormituskertaluku. Funktiot ovat mekanistis-empiirisiä eli funktioiden murtokriteeri perustuu suureen määrään kenttähavaintoja sekä tietyn mitoitusmenetelmän jännitysmuodonmuutosanalyysiin. Rakenteet sekä pohjamaat ovat hyvin erilaisia eri puolilla maailmaa. Funktiot ovat sidottuja tiettyihin mitoitusmenetelmiin, eikä niitä tulisi verrata keskenään tai soveltaa suoraan toiseen mitoitusmenetelmään. (Rodway & Wardle 1998.)

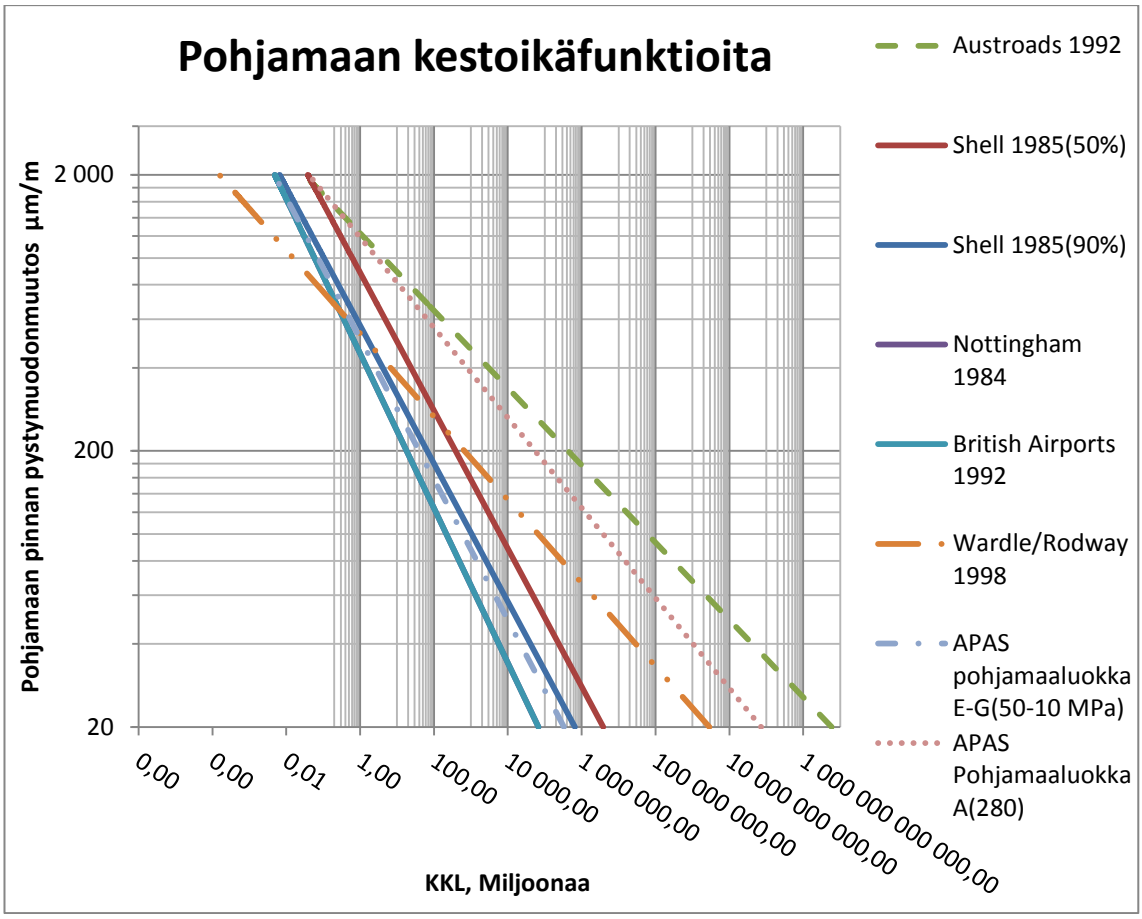
Kuvassa 8 sekä taulukoissa 3 ja 4 on kuitenkin havainnollistettu eri kestoikäfunktioiden eroavaisuutta. Funktiot ovat kaavan 2 mukaisessa muodossa:

$$N = \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^b \qquad (2)$$

jossa,

N	on kuormituskertojen määrä
k	on materiaaliparametri
b	on vaurio eksponentti
ε	on liikennekuormituksesta aiheutuva pohjamaanpinnan pystymuodonmuutos. (Rodway & Wardle 1998)

Kuvaan 8 on piirretty myös suomalaisen APAS-mitoitusohjelman pohjamaan kestoikäfunktioita. Taulukossa 3 oleva prosenttiluku kuvaa todennäköisyyttä, millä rakenne on vielä ehjä suunnitteluiän täytyttyä. Esimerkiksi laskennallisen pohjamaan pinnan pystymuodonmuutoksen ollessa 500 µm/m, kuormitusten lukumäärän ero Austrods ja Wardle / Rodwayn mallin välillä on yli 600 miljoonaa.



Kuva 8. Pohjamaan kestoikä-funtioita, muuttujana pohjamaan pystymuodonmuutos.

Taulukko 3. Pohjamaan kestoikäfunktioita. (Rodway & Wardle, 1998)

Mitoitusmenetelmä	Murtokriteeri k	Murtokriteeri b	Lähde	Tod.näk. Että kestää pidempään
Austroads (1992)	0,008511	7,14	CBR Design Chart 8.4	80-90%
Shell (1985)	0,028	4	AASHO Road Test	50 %
Shell (1985)	0,018	4	AASHO Road Test	95 %
Nottingham University (Brown/Brunton, 1984)	0,0216	3,57	U.K. Road Note 29	n.a.
British Airports Authority (Woodman, 1992)	0,00582	5,747	U.S. Army Corps of Engineers Aircraft test pavements	50 %

Taulukko 4. Pohjamaan kestoikäfunktioiden vertailu. (Rodway & Wardle 1998)

Kuormituskertaluku	KKL				
	Pohjamaan pinnan laskennallinen muodonmuutos εy µm/m				
Mitoitusmenetelmä	500	800	1000	1500	2000
Austroads (1992)	618 000 000	22 000 000	4 400 000	240 000	30 000
Shell (1985)	9 800 000	1 500 000	620 000	120 000	38 000
Shell (1985)	1 700 000	260 000	105 000	21 000	6 500
Nottingham University (Brown/Brunton, 1984)	620 000	130 000	58 000	14 000	5 000
British Airports Authority (Woodman, 1992)	1 300 000	90 000	25 000	2 400	460
Wardle/Rodway (1998)	1 500 000	68 000	15 000	1 000	160

Routamitoituksen vuoksi sitomattomat rakennekerrokset ovat Suomessa paksuja hienorakeisilla routivilla alusrakenteilla. Tästä seuraa, ettei tie- ja katurakenteissa alusrakenteen deformoituminen routivilla pohjamailla ole yleensä kuormituskestävyyden kannalta kriittistä. (Ehrola 1996, s. 56.)

3.3 Halkeamat

3.3.1 Verkkohalkeamat

Kadun pintaan syntyy kadun pituus- ja poikkisuunnassa halkeamia. Kadun pituussuuntaiset halkeamat ovat joko routanousun tai liikennekuormituksen synnyttämiä halkeamia. Kadun poikkisuuntaisia halkeamia aiheuttavat routanousu ja pakkaskatkot.

Varsinkin suurilla liikennemäärillä asfaltin pintaan voi syntyä verkkohalkeilua, kuva 9. Halkeilun perussyynä on asfaltin väsyminen, joka tarkoittaa sitä, että bitumin murtolujuus sekä venymä pienenevät kuormituskertojen lisääntyessä. (Belt ym. 2002.)

Verkkohalkeaman alkuvaiheessa asfaltin alapintaan syntyy pituussuuntaisia hiushalkeamina ajourien kohdalle. Kuormituskertojen jatkuessa hiushalkeamat lisääntyvät ja alkavat yhtyä hiushalkeamaverkoksi. Tällöin päällysteen jäykkyys pienenee ja pyöräkuorman synnyttämät palautuvat vetomuodonmuutokset kasvavat. Hiushalkeamat kehittyvät makrohalkeamiksi edeten tien pintaa kohti, jolloin päällysteen pintaan alkaa muodostua näkyviä vaurioita (Ehrola 1996). Vaurioitumisen viimeisessä vaiheessa asfaltin pinnassa esiintyy kuvan 9 mukaista verkkohalkeilua, jolloin päällyste on saapunut elinkaarensa loppuun.

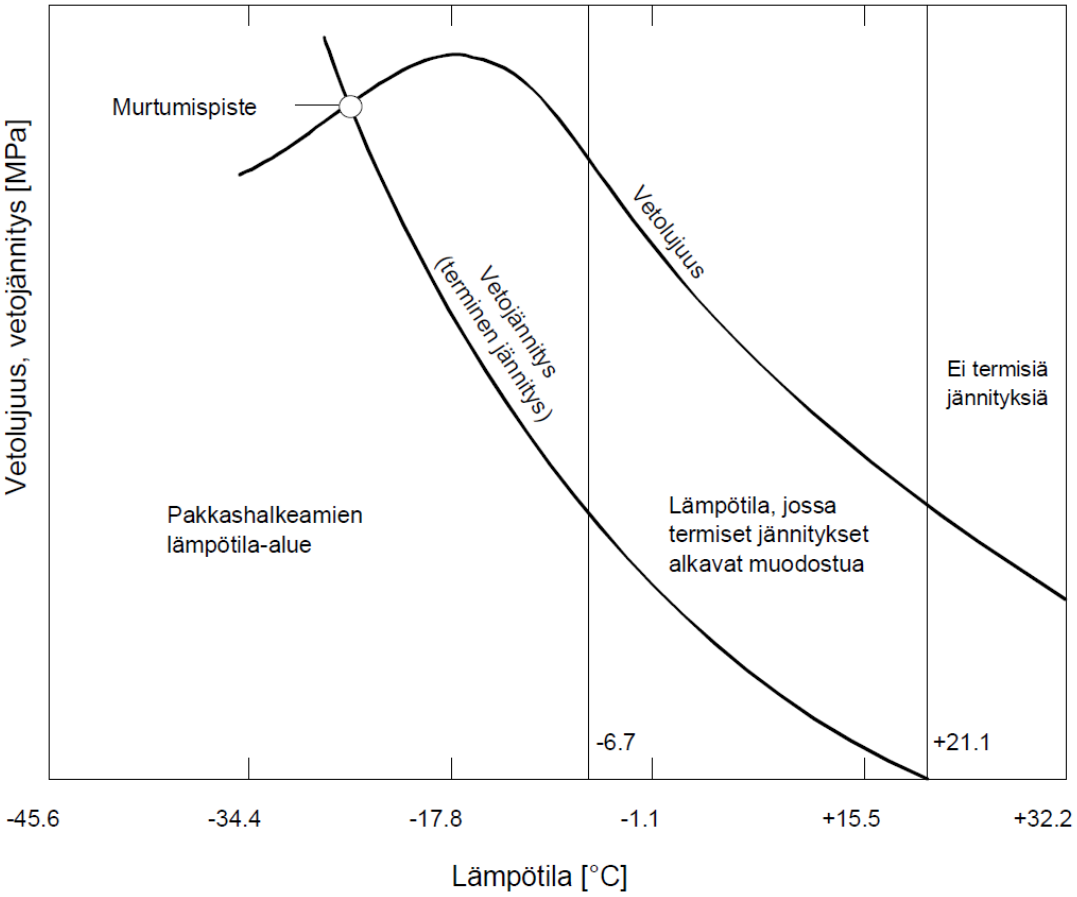
Mikäli raskaan liikenteen aiheuttamien kuormitusten lukumäärä toteutuu hitaasti, ei asfaltin väsyminen ole enää ensisijainen vaurioitumismekanismi vaan päällysteeseen syntyy vaurioita muista syistä (Pihlajamäki J. & Spoof H. 2001). Kaduilla, joissa raskaan liikenteen määrä on vähäinen, päällysteen uusimistarpeen aiheuttajana on usein nastarenkaiden aiheuttama kuluminen sekä routavauriot, kuin asfalttiin syntyneet verkkohalkeamat.

Kuva 9. Pitkälle kehittynyt verkkohalkeama. (Petäjä & Spoof, 2001)

3.3.2 Termiset muodonmuutokset

Talvella päällysteen lämpötilan laskiessa asfalttilaatta pyrkii kutistumaan. Kutistuminen on kuitenkin estetty sitomattomien kerrosten tartunnan vuoksi, jolloin asfalttiin syntyy vetojännityksiä, jotka aiheuttavat halkeamia eli pakkaskatkoja. Pakkashalkeamat syntyvät ensin päällysteen yläpintaan, jossa kutistumisjännitykset ovat suurimmillaan. Pinnasta halkeamat etenevät lämpötilan laskiessa asfaltin läpi. Asfalttiin syntyy yleensä säännöllisin välein tien poikkisuuntaisia halkeamia, jotka katkaisevat asfaltin ja usein sen alla olevat kerrokset. (Ehrola 1996)

Vetojännitysten suuruuteen vaikuttaa asfaltin viskoelastisuudesta johtuva jännitysten purkautuminen eli relaksoituminen. Kuvassa 10 on esitetty jännitysten suuruus ja asfaltin vetolujuus lämpötilan funktiona. Relaksoituminen on voimakasta korkeissa lämpötiloissa, mutta alhaisissa lämpötiloissa relaksoituminen on enää hyvin vähäistä. Mitä nopeammin päällysteen lämpötila laskee, sitä pienempää on vetojännitysten relaksoituminen.



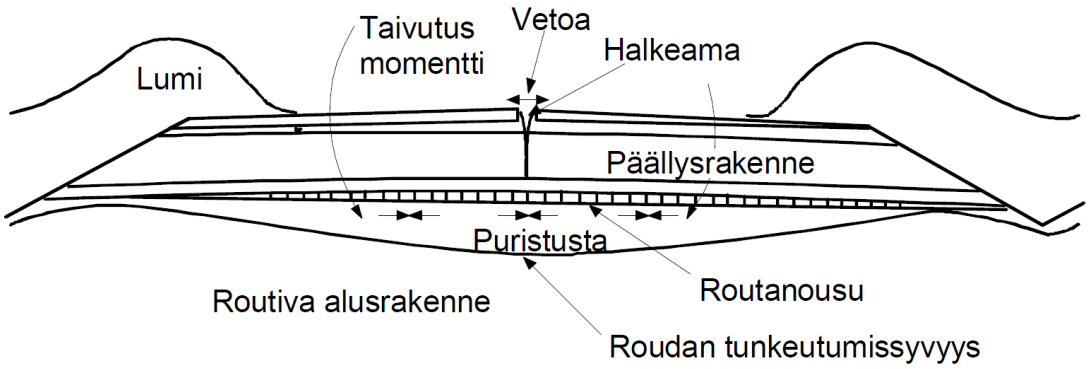
Kuva 10. Asfaltin pakkaskatkojen syntymisperiaate (Belt ym. 2002)

3.4 Routavauriot

Routaan liittyy kaksi peruskäsitettä: routaantuminen ja routiminen. Routaantuminen tarkoittaa maa-aineksen jäätymistä. Routiminen tarkoittaa maan jäätymistä, minkä yhteydessä maan tilavuus kasvaa.

Routa vaurioittaa kadun rakenteita kahdella tavalla. Talvella routanousu aiheuttaa vetojännityksiä ja näin ollen halkeamia asfaltin pintaan. Keväällä roudan sulaessa alusrakenteen kantavuuden heikkeneminen rasittaa päällysrakennetta.

Routanousu
Routimisesta johtuvan tilavuuden kasvun seurauksena tapahtuu maarakenteen pinnassa routanousua. Kuvan 11 mukaisesti routanousu on jakaantunut epätasaisesti kadun poikkileikkaukseen, jolloin aiheutuu asfaltin pintaan vetojännityksiä. Vetojännitysten ylittäessä asfaltin vetolujuuden syntyy halkeamia.



Kuva 11. Routimisen aiheuttaman routahalkeaman synty. (Belt ym. 2002)

Päällysrakenne tehdään routimattomasta materiaalista, jolloin routanousu aiheutuu pääasiassa routivasta alusrakenteesta. Kadussa routanousua alkaa muodostua siinä vaiheessa, kun routiva alusrakenne alkaa jäätyä.

Jotta alusrakenteessa tapahtuu routimista, tulee seuraavat kolme ehtoa täyttyä:

- routiva alusrakenne
- riittävän pitkän aikaa alhainen lämpötila, jolloin alusrakenne jäätyy
- saatavilla oleva vapaa vesi

Mikäli jokin näistä tekijöistä uupuu, routimista ei tapahdu tai routiminen on vähäistä.

Sulamispehmeneminen

Sulamispehmeneminen on keväällä roudan sulaessa tapahtuvaa rakenteen kantokyvyn heikkenemistä. Ongelmia aiheuttaa rakenteessa oleva ylimääräinen vesi sekä routivan alusrakenteen löyhtyminen routimisen yhteydessä. Maan tehokas leikkauslujuus voidaan laskea yleisesti tunnetulla Mohr-Coulombin kaavalla, kaava 3.

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \tan\phi' = c' + (\sigma - u) \cdot tan\ \phi' \qquad (3)$$

jossa,

τ'	on maan tehokas leikkauslujuus
c'	on maan tehokas koheesio
σ'	on vallitseva tehokas normaalijännitys
ϕ'	on maan tehokas sisäinen kitkakulma
σ	on vallitseva normaalin suuntainen kokonaisjännitys
u	on vallitseva huokosvedenpaine. (Wood 1990.)

Maan leikkauslujuus on kokonaisjännitysten ja huokosvedenpaineen funktio. Tehokas normaalijännitys on maassa vallitsevan kokonaisjännityksen ja huokosvedenpaineen erotus. Eli huokosvedenpaineen kasvu kokonaisjännitysten pysyessä samana pienentää maan lujuutta.

Sulaminen alkaa pääasiassa rakenteen yläosasta kohti routarajaa. Sulamisrintaman alapuolisen osan ollessa jäässä ylimääräisen veden poistuminen rakenteesta hidastuu merkittävästi. Vedellä kyllästetyssä maassa liikennekuormitus saattaa nostaa huokosveden painetta, mikäli huokostilassa oleva vesi ei pääse poistumaan. Mitä hienorakeisempaa maa on, sitä huonompi on sen vedenläpäisevyys ja sitä helpommin syntyy huokosve-

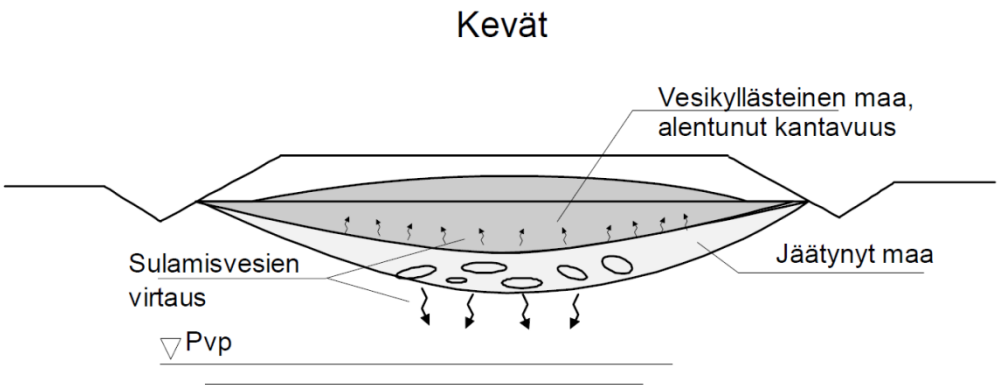
denpainetta liikennekuormituksesta. Taulukossa 5 on esitetty materiaalien kantavuusominaisuuksien suhteellisia heikkenemisiä keväällä roudan sulamisen aikana.

Taulukko 5. Kantavuuden suhteellinen heikkeneminen keväällä. (Doré & Zubeck 2009, s.100)

Materiaali	Kantavuuden heikentyminen
sora / hiekka	0-15%
silttinen/savinen sora ja hiekka	20-50%
siltti	30-70%
savi	40-60%

Roudan sulamisen aikaan pysyviä muodonmuutoksia eli urautumista tapahtuu alkukeväästä päällysrakenteen sitomattomissa kerroksissa ja loppukeväästä alusrakenteessa. Kantavan sitomattoman kerroksen murskeen vedenläpäisevyys on suuri, jolloin huokosvedenpaine purkautuu nopeasti. Kuitenkin alkukeväästä, kun kerroksen yläosa on sulanut ja maa on vedellä kyllästynyt, kuva 12, nopean toistuvan kuormituksen alaisena syntyy huokosvedenpaineen huippuja, jotka purkautuvat nopeasti. Näiden huokosvedenpaineen huippujen aikana, maan leikkauslujuuden laskiessa, voi tapahtua pysyviä leikkausmuodonmuutoksia. Riski on suurin kun kuormitusten väli on pieni, esimerkiksi ajoneuvoilla, joissa on useampi akseli peräkkäin. Materiaalin hienoainespitoisuudella on suuri merkitys muodonmuutosten kehittymiselle. (Belt ym. 2006, s.14)

On esitetty myös, että vaikka päällysrakenteen materiaalit ovat routimattomia materiaaleja, niin niissä kuitenkin tapahtuu vähäistä routimista jolloin niiden tiiveys huononee. Maan sulettua kuormituksen alla tapahtuu tiivistymistä joka ilmenee päällysteen urautumisena. (Doré & Zubeck 2009, s.97).



Kuva 12. Roudan sulamisen ensimmäinen vaihe. (Rahiala, 1988)

Alusrakenteessa routimisen yhteydessä on tapahtunut tilavuuden kasvua ja siihen kapillaarisesti imeytynyt vesi on löyhdyttänyt maata. Jäälinssien sulaessa alusrakenne on löyhemmässä tilassa ja sen vesipitoisuus on suuri. Tällöin alusrakenteen kantavuus on pienimmillään, jolloin sen antama tuki päällysrakenteelle on pienimmillään ja pysyvien muodonmuutosten syntyminen suurinta. (Hentilä ym. 1994, s.13) Pohjoisilla alueilla keväällä tapahtuu yli puolet teiden tai katujen rakenteiden vaurioitumisesta. (Doré & Zubeck 2009, s.99-105)

3.5 Konsolidaatiopainumat

Pehmeillä pohjamailla, kuten savella ja turpeella, päällysrakenteen omapaino aiheuttaa pohjaamaan painumaa. Penkereen aiheuttaman kuormituksen vaikutuksesta alkaa savikerroksen huokosista oleva vesi poistua, jolloin maan tilavuus pienenee eli penger painuu. Tätä kutsutaan primaariseksi konsolidaatiopainumaksi.

Maakerroksen tilavuuden pieneneminen jatkuu sekundaarisen konsolidaation johdosta, joka oletetaan alkavan kun noin 90 % primaarisesta konsolidaatiopainumasta on tapahtunut. Tilavuuden pieneneminen on seurausta raerungon hiipumisesta, joka on hidasta maan virumista. Sekundaaripainumalla on merkitystä erityisesti turpeilla ja liejuilla, joilla runko-aines on voimakkaasti kokoonpuristuvaa. (RIL 95 Pohjarakennus 1974.) Tässä työssä painumia tarkastellaan ainoastaan primaarisen konsolidaatiopainuman osalta.

3.6 Kunnallistekniikka

Katu on ensisijaisesti kunnallisteknisten johtojen ja laitteiden sijoituspaikka. Kadun alla sijaitsevien putkien arinarakenteet ja ympärystäytöt tekevät kadun alusrakenteesta hyvin epätasalaatuisen. Putkilinjojen ja kadun erisuuruiset painumat voivat ilmetä kadun pituus- ja poikkisuuntaisena epätasaisuutena.

Kunnallisteknisten johtojen ja putkien asentaminen jo rakennetun kadun alle vaatii rakennekerrosten kaivamista. Asentamisen jälkeen uudelleen tehdyt rakenteet eivät tiiveytensä puolesta välttämättä vastaa alkuperäistä rakennetta. Mikäli kaivantojen tiivistystyötä ei tehdä huolellisesti, jäävät kaivantojen kohtien rakenteet ympäristöään löyhempään tilaan. Löyhemmässä tiiveystilassa olevilla rakenteilla tapahtuu suurempia muodonmuutoksia kuin tiiviissä tilassa olevilla, jolloin katuun muodostuu kaivantojen kohdalle painaumia.

4 Kadun rakennekerroksien mitoitus

4.1 Mitoituskäytäntö

Kadut jaotellaan InfraRYLissä liikennemäärien mukaisesti katuluokkiin taulukon 6 mukaisesti. Katuluokille on määritetty tavoitekantavuudet, jotka perustuvat suureen määrään tieverkolla tehtyihin levykuormituskokeiden E_2 arvoihin ja kuormitusolosuhteisiin.

Taulukko 6. Katuluokitus InfraRYLin mukaisesti. (InfraRYL 2010)

Katuluokka	Kuvaus	Liikennemäärä, ajon./vrk
1	Erittäin raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2 + 2)	> 30 000
2	Raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2 + 2)	10...30 000
3	Pääkatu, kokoojakatu tai vilkasliikenteinen kerrostaloalueen asuntokatu (ajokaistoja 1 + 1)	2 500...10 000
4	Asuntokatu tai pientaloalueen kokoojakatu, raskaiden ajoneuvojen pysäköintialueet	500...2 500
5	Pientaloalueen asuntokatu, huoltoliikenteen väylät, henkilöautojen pysäköintialueet	10...500
6	Jalkakäytävät, pyörätiet, puistotiet; ei ajoneuvoliikennettä	-

Pohjamaa niin ikään jaetaan luokkiin kantavuuden ja routivuuden perusteella. Kadun kantavuus lasketaan Odemarkin mitoitusyhtälöllä, kaava 4, joka pohjautuu Nils Odemarkin vuonna 1949 kehittämään laskentakaavaan. Päällysrakenteen paksuutta kasvatetaan, kunnes laskennallisesti saavutetaan kadulle vaadittu kantavuus. Odemarkin mitoitusyhtälön käyttö ei edellytä kuormituskertaluvun laskemista, vaan suuremmille liikennemäärille vaaditaan kadulta suurempi kantavuus.

InfraRYListä löytyy valmiit rakennekerrostaulukot katuluokittain eri pohjamaille. Kuormituskestävyysmitoituksen lisäksi rakenteelle tehdään routamitoitus. Rakenteen lopullinen paksuus määräytyy kantavuus- ja routamitoituksen perusteella. (InfraRYL 2010)

Taulukossa 7 on esitetty eri mitoitusohjelmia. Taulukosta nähdään, että vuonna 2000 suurin osa ohjelmista perustui monikerrosteoriaan aivan kuten suomalainen APAS. Kehittyneempää puolta edustaa hollantilainen CAPA-3D. CAPA-3D:ssä mitoitus perustuu kolmiulotteiseen elementtimenetelmään. Ohjelman ominaisuuksilla pystytään ottamaan huomioon monia päällysrakenteen mitoittamiseen liittyviä tekijöitä, kuten dynaaminen kuormitus, lämpötila sekä materiaalien anisotrooppisuus. (AMADEUS 2000.)

Taulukko 7. Päällysrakenteen mitoitusohjelmia kansainvälisesti. (AMADEUS 2000)

Ohjelman nimi	Menetelmä	Maa	Epälineaarisuus	Anisotrooppisuus	ilmaston vaikutus	Dynaaminen kuormitus	Akselien vastaavuus	Rengastyyppi	Lämpötilan vaikutus	Vauriosumma	Asfaltin väsyminen	Urautuminen
CAPA-3D	FEM, 3D	Hollanti	x	x		x		x	x	x	x	x
CESAR	FEM, 3D	Ranska	x	x	x	x		x		x	x	x
SYSTUS	FEM, 3D	Australia	x	x		x		x				
AXYDIN	FEM, axi-symmetric	-				x						
MICHPAVE	FEM, axi-symmetric	USA	x								x	
APAS	Monikerros	Suomi			x		x	x	x		x	
BISAR/SPDM	Monikerros	USA			x		x				x	x
CIRCLY	Monikerros	Australia		x			x	x		x	x	
ECOROUTE	Monikerros	Ranska						x		x		
KENLAYER	Monikerros	USA	x			x		x		x	x	x
MMOPP	Monikerros	Tanska	x		x	x	x	x		x	x	x
NOAH	Monikerros	USA		x	x		x				x	x
ROADENT/WESLEA	Monikerros	USA			x		x	x				
VAGDIM 95	Monikerros	Ruotsi			x				x	x	x	x
VEROAD	Monikerros	USA					x	x				
VESYS	Monikerros	USA			x		x	x		x	x	x

4.2 Odemarkin mitoitusyhtälö

Kadun rakennekerroksien mitoitus perustuu kaavan 4 mukaiseen Odemarkin mitoitusyhtälöön ja sen lisäehtoihin. (InfraRYL 2010, Tiehallinto 2004)

$$E_P = \frac{E_A}{\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+0{,}81\cdot\left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right)*\frac{E_A}{E}+\frac{1}{\sqrt{1+0{,}81\cdot\left(\frac{h}{a}\right)^2\left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}} \qquad (4)$$

jossa:

E_A	on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
E_P	mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)
E	mitoitettavan kerroksen materiaalin E -moduuli (MPa)
h	mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
a	0,15m, joka on levykuormituskokeen levyn säde

Lisäehto 1: Sitomattoman kerrokset $E \leq 6 \cdot E_A$

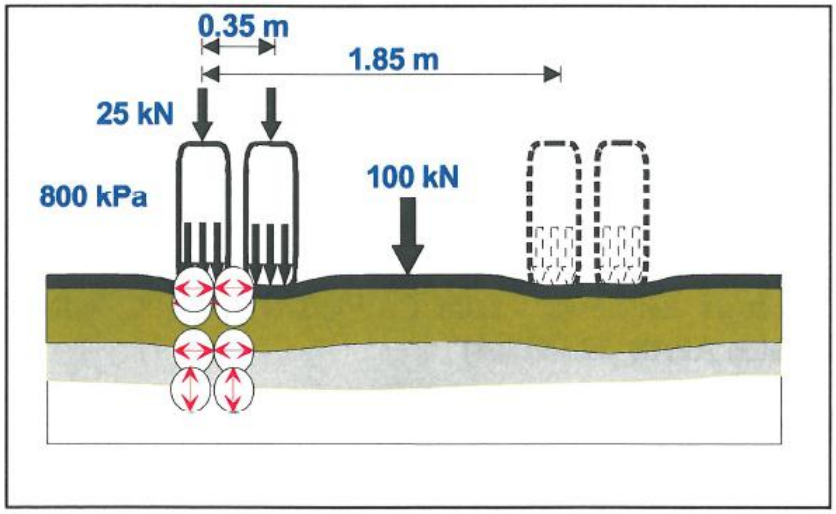
Lisäehto 2: Bitumilla sidotut kerrokset lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo. (Tiehallinto 2004, s.33)

Odemarkin mitoitusyhtälö perustuu kimmoteoriaan ja elastiseen puoliavaruuteen. Menetelmässä kerrokset yhdistetään alhaalta ylöspäin yhdeksi kerrokseksi, jonka kimmoiset ominaisuudet ovat samat kuin yhdistettyjen kerrosten yhteiset ominaisuudet.

4.3 APAS monikerroslaskenta

APAS on analyyttinen päällysrakenteen suunnittelujärjestelmä, joka perustuu monikerroslaskentaan sekä kestoikä-funktioihin. APAS laskee liikennekuormituksesta rakenteeseen aiheutuvat veto- ja puristusjännitykset mekanistisen mallin avulla, kuva 13. Mitoituksessa kriittisimpiä kohtia ovat asfaltin alapinnan vetomuodonmuutos, sitomattoman kantavan kerroksen sekä pohjamaan pystymuodonmuutokset. Ohjelmaan on tallennettu Liikenneviraston hyväksymät materiaalien kestoikäfunktiot. Kestoikäfunktiot ovat kokemusperäisesti tai laboratoriokokein määritettyjä malleja, jotka määrittävät erityyppisille materiaaleille veto- tai puristusmuodonmuutosta vastaavan sallitun kuormituskertaluvun.

Kuormituskertaluku (KKL) lasketaan akselien vastaavuuskertoimilla siten, että saatu KKL vastaa standardiakselin (100 kN akselikuorma, paripyörä) ylityskertoja. Kuormituskertaluvun laskeminen käsitellään XPS-rakenteen mitoituksen yhteydessä kappaleessa 7.3. (APAS_3 mitoitusohjelman käyttöohje 2004.)



Kuva 13. APAS ohjelman mallikuva paripyörän liikennekuormituksesta. (APAS_3 mitoitusohjelman käyttöohje 2004)

Mitoituksen lähtöoletukset ovat seuraavat:

- rakenne koostuu tasapaksuista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä kerroksista
- kerrokset käyttäytyvät lineaarisen kimmoteorian mukaisesti
- pohjamaa on ääretön vaaka- ja pystysuunnassa
- rakenteet oletetaan isotrooppiseksi
- rakenteiden omaa painoa ei oteta huomioon

APAS soveltuu yli 80 mm paksujen sidottujen kerrosten omaavien rakenteiden mitoittamiseen. Ohjelman moduulit ja kestoikä-funktiot ovat sovitettuja niin, että rakenteiden

paremmuusjärjestys vastaa kenttähavaintoja sekä rakenteiden mitoitusikä on sama kuin Odemarkin yhtälöllä mitoitettujen rakenteiden. Tästä johtuen APAS on empiirismekanistinen mitoitusmenetelmä, jossa on hyvin paljon myös hallinnollisesti määritettyjä parametreja. APAS soveltuu perinteisten rakenteiden mitoittamiseen, kun halutaan korostaa eri päällysteiden ominaisuuksia, mutta sen käyttö erikoisrakenteiden mitoituksessa ei välttämättä anna oikeita tuloksia. (Lehtonen 2009.)

4.4 Elementtimenetelmät

4.4.1 Taustaa

Elementtimenetelmä eli Finite Element Method (FEM) on kehitetty osittaisdifferentiaaliyhtiöiden numeeriseen ratkaisemiseen. Fysiikan ilmiöt kuvataan usein differentiaaliyhtälöillä, joiden ratkaiseminen analyyttisesti on työlästä tai mahdotonta. Elementtimenetelmä, yhdessä nykyaikaisten tietokoneiden kanssa, on työkalu löytää numeerinen ratkaisu monimutkaisiin fysikaalisiin ilmiöihin.

Ensimmäisiä FEM-sovelluksia käytettiin rakennetekniikassa ja lentokoneiden suunnittelussa jo 1960-luvulla jännitysten ja siirtymien ratkaisemiseen. Kehitys on sen jälkeen kulkenut käsi kädessä tietotekniikan kehityksen kanssa. Nykypäivänä numeeristen menetelmien sovelluskohteita on lähes jokaisella luonnontieteen saralla.

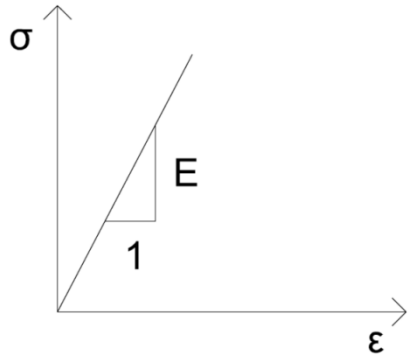
Geomekaniikassa maan käyttäytymistä kuvataan erilaisilla materiaalimalleilla. Materiaalimallit ovat matemaattisia malleja maan käyttäytymiselle. Mitä kehittyneempi malli sitä enemmän tarvitaan materiaaliparametreja lähtötiedoiksi.

FEM-ohjelmien käyttö katurakenteen mitoituksessa
Elementtimenetelmää on Suomessa käytetty tie -ja katurakenteiden mitoitukseen lähinnä tutkimusmielessä. Päällysrakenteen mitoitus eroaa tavallisesta geomekanistisesta ongelmasta siihen kohdistuvan kuormituksen monimutkaisuuden vuoksi. Kuten taulukosta 7 nähtiin, on jo maailmalla käytössä elementtimenetelmään perustuvia päällysrakenteen mitoitusohjelmia. Tätä työtä varten ei ole mahdollisuuksia hankkia ohjelmia, vaan mitoitus tehtiin PLAXIS-2D ohjelmalla. Ohjelmalla laskettiin jännitysmuodonmuutos käyttäytyminen staattisen kuormituksen alaisena. Mitoittamista varten käytettiin soveltuvin osin APAS-ohjelman kestoikä-funktioita.

4.4.2 PLAXIS-2D materiaalimallit

Lineaarisesti kimmoinen
Plaxiksen Linear Elastic model materiaalimalli perustuu Hooken yleistettyyn lakiin. Ajasta riippumaton, homogeeninen, isotrooppinen ja lineaarisesti kimmoinen materiaalimalli tarvitsee lähtötiedoiksi kaksi lujuusparametria, esim. kimmokerroin E ja Poissonin luku ν. Kaavassa 5 on esitetty yksiulotteinen Hooken laki.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \tag{5}$$

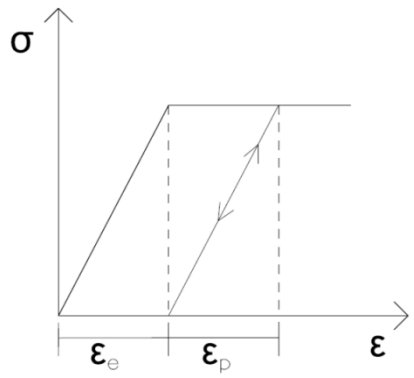


Kuva 14. Lineaarisesti kimmoinen materiaalimalli.

Malli ei kuvaa maan käyttäytymistä kovin hyvin, mutta sitä voidaan käyttää riittävällä tarkkuudella mallintamaan esimerkiksi asfalttia, peruskalliota tai muita jäykempiä rakenteita maassa. Mallissa ei ole myötörajaa, eli jännitykset voivat kasvaa loputtomiin, kuva 14. Mallia käytettäessä onkin tärkeää tarkistaa, että jännitystilat pysyvät sellaisella alueella, että materiaalin voidaan olettaa käyttäytyvän kimmoteorian mukaisesti materiaalin murtokuormaa ylittämättä. (PLAXIS 2011.)

Kimmoplastiset mallit
Todellista maan käyttäytymistä kuvaavat paremmin kimmoplastiset materiaalimallit, joissa muodonmuutokset ovat tietyn jännitystason jälkeen pysyviä. Kimmoplastisessa mallissa muodonmuutokset jaetaan kuvan 15 mukaisesti kimmoiseen ja plastiseen muodonmuutoksen osaan. Kimmoisia muodonmuutoksia kuvataan konstitutiivisten yhtälöiden avulla ja plastinen muodonmuutoskäyttäytyminen lasketaan myötörajan, myötösäännön ja myötölujenemislain perusteella.(Vepsäläinen 1990)

Mohr-Coulomb
Mohr-Coulombi on elasto-plastinen materiaalimalli. Muodonmuutokset ovat kuvan 15 mukaisesti kimmoisia kun jännitykset ovat myötörajan alapuolella ja täydellisesti plastisia kun jännitykset on myötörajan yläpuolella. (PLAXIS 2011.)



Kuva 15. Mohr-coulomb materiaalimallin jännitys-muodonmuutos käyttäytyminen.

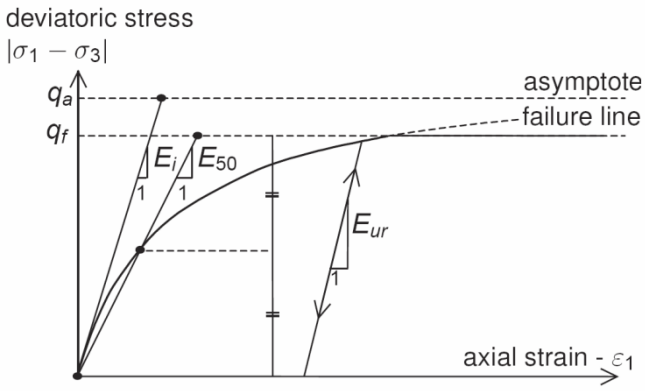
MC-mallissa tarvitaan lähtötietoina seuraavat viisi parametria:

Kimmomoduuli	E	kN/m^2
Poissonin luku	ν	-
Kitkakulma	φ	°
Koheesio	c	kN/m^2
Dilataatiokulma	ψ	°

Mohr-Coulombin mallia käytetään mallintamisen alkuvaiheessa mallinnuksen toimivuuden tarkistamiseen. Kun puhutaan päällysrakenteen mitoituksesta niin Mohr-Coulombin mallia ei voida pitää riittävän tarkkana jännitys-muodonmuutos analyysin tekemiseen.

Hardening soil

Hardening soil (myöhemmin HS) on myötölujittuva kimmoplastinen materiaalimalli. HS sisältää samat lujuusparametrit kuin MC -malli, mutta muodonmuutosominaisuudet ovat määritetty tarkemmin, kuva 16. HS mallissa maakerroksen jäykkyys ei ole vakio, vaan jännityksestä riippuva epälineaarinen suure. HS-malli soveltuu liikennekuormituksen alaisen maan mallintamiseen, koska malli kuvaa hyvin myös intensiteetiltään vaihtelevia kuormituksia. Taulukosta 8 ilmenee HS-mallin lujuus- ja jäykkyysparametreja.



Kuva 16. Hardening Soil-mallin jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen. (PLAXIS)

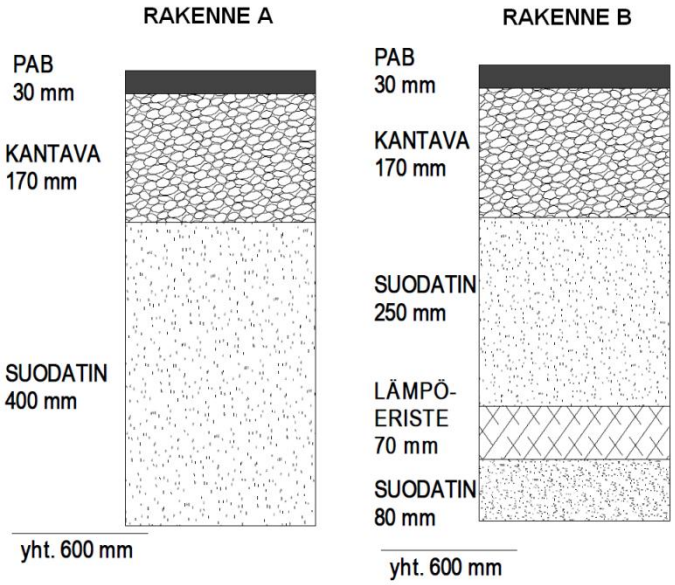
Taulukko 8. Harnening Soil mallin parametreja. (PLAXIS 2011)

Symboli	Nimi	Yksikkö
c'	tehokas koheesio	kN/m^2
ϕ'	tehokas leikkauskestävyyskulma	°
ψ	dilataatiokulma	°
E_{50}^{ref}	ensikuormituksen sekanttimoduuli referenssipaineella	kN/m^2
E_{oed}^{ref}	tangenttimoduuli referenssipaineella	kN/m^2
E_{ur}^{ref}	kuorman vähennyksen/toistokuormituksen sekanttimoduuli referenssipaineella (oletuksena 3 * E_{50}^{ref})	kN/m^2
m	jännitysekspo nentti	-
p_{ref}	referenssipaine (oletuksena 100)	kN/m^2
K_0^{nc}	normaalikonsolidoituneen tilan lepopainekerroin (oletuksena 1-sinϕ')	-

5 XPS vaikutus kadun rakenteiden toimintaan

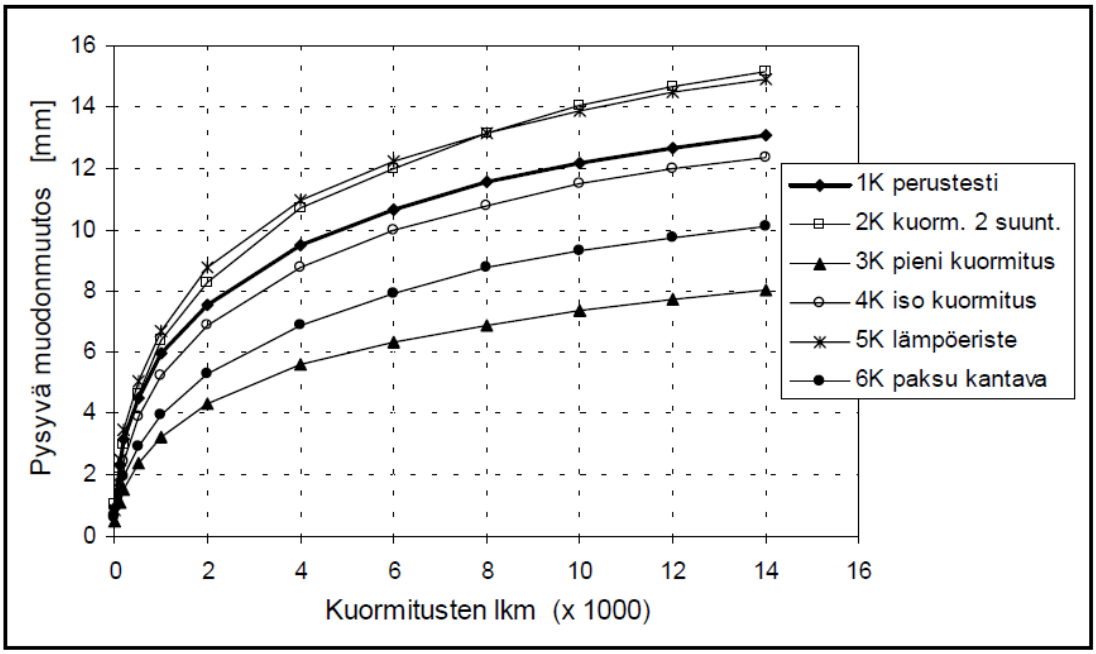
5.1 Sitomattomien rakennekerrosten deformaatiot

Tiehallinnon *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen* – projektissa tutkittiin sitomattoman kantavan kerroksen pysyviä muodonmuutoksia laboratoriossa koeratalaitteistolla. Yhdessä koerakenteessa heikkoa pohjamaata simuloitiin lämpöeristeellä, kuva 17. Lämpöeristeenä käytettiin Finnfoamin F400 XPS – levyä.



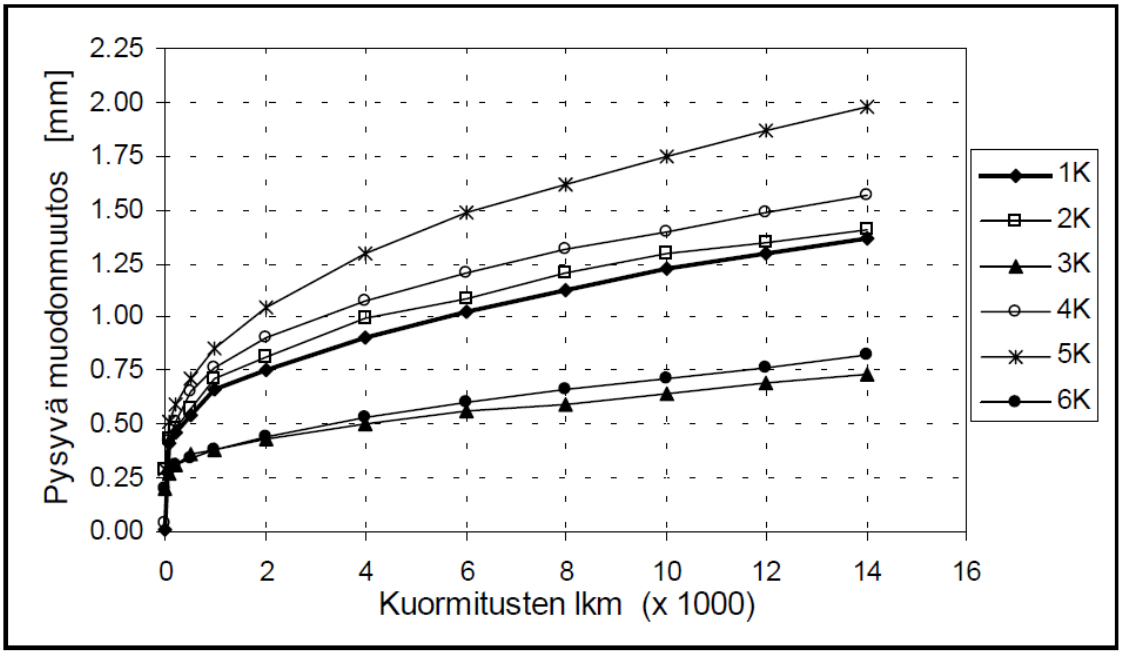
Kuva 17. Rakenne A on normaali rakenne ja rakenne B:ssä heikkoa alusrakennetta on simuloitu lämpöeristeellä. (Belt ym. 2000)

Kuvasta 18 nähdään, että rakenteella B (kuvassa testi 5K) kantavan kerroksen yläpinnan mitattu muodonmuutoskäyttäytyminen on lähes yhdensuuntaista rakenteen A (kuvassa testi 1K) kanssa. Rakenteella B pysyvät muodonmuutokset ovat 14 000 kuormituskerran jälkeen noin 15 % suuremmat kuin rakenteella A, joka tarkoittaa noin 1,9 mm eroa. (Belt ym. 2000)



Kuva 18. Kokeessa mitatut kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät pystysuuntaiset muodonmuutokset. (Belt ym. 2000)

Kantavan kerroksen ja hiekkakerroksen välissä oli yksi siirtymäanturi. Rakenteen B pysyvät muodonmuutokset kasvavat kuormituskertojen lisääntyessä suhteessa rakenteeseen A, kuva 19. Rakenteella B pysyvät muodonmuutokset ovat 14 000 kuormituskerran jälkeen noin 45 % suuremmat kuin rakenteella A, joka tarkoittaa noin 0,6 mm eroa. Tämä voi selittyä XPS-levyn päälle rakennetun kerroksen huonosta tiivistyvyydestä, vaikka koerakenteessa kerrokset raportin mukaan tiivistettiin samaan tavoitetiiviyteen. Kyseisen tutkimuksen perusteella XPS-levyn käyttö rakennekerroksissa kasvattaa levyn yläpuolisten sitomattomien rakennekerrosten pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 19. Kokeessa mitatut kantavan kerroksen alaosan pysyvät pystysuuntaiset muodonmuutokset. (Belt ym. 2000)

5.2 Eristeen aiheuttama liukkausvaara

Syksyisin tiettyjen sääolosuhteiden vallitessa voi asfaltin pintaan muodostu ns. ”mustaa jäätä”. Mustaa jäätä syntyy kun asfaltin pinnan lämpötila laskee alle nollan asteen ja ilmassa oleva vesihöyry kondensoituu ja jäätyy asfaltin pintaan.

Lämpö voi siirtyä johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä. Asfaltista lämpö poistuu säteilemällä sekä konvektiolla ja asfalttiin lämpöä siirtyy maasta johtumalla. XPS – levy on eriste, eli sen lämmönjohtavuus on erittäin pieni. Eriste rakennekerroksissa estää lämmön johtumisen maasta eristeen yläpuolisiin rakenteisiin, jolloin asfaltin pinta jäähtyy nopeammin kuin rakenteen jossa eristettä ei ole.

Liikenneviraston suositus teille on 700 mm rakennekerroksia eristeen päälle. Ruotsissa vastaava suositus on 500 mm ja Norjassa 300 mm. (Saarelainen 2003, s.26)

Tässä työssä keskitytään päällysrakenteen mitoittamiseen ja liukkausvaaraa ei ole sen tarkemmin tutkittu. Oletetaan, että 500 mm rakennekerroksia eristeen päällä riittää ehkäisemään mustan jään syntymistä. Vaikka joissain olosuhteissa syntyisikin mustaa jäätä, on sen aiheuttama vaara vähäinen, varsinkin jos kyseessä on yhtenäinen kadun osuus, jossa nopeudet ovat alhaisia.

6 Suulakepuristettu polystyreeni

6.1 Yleistä

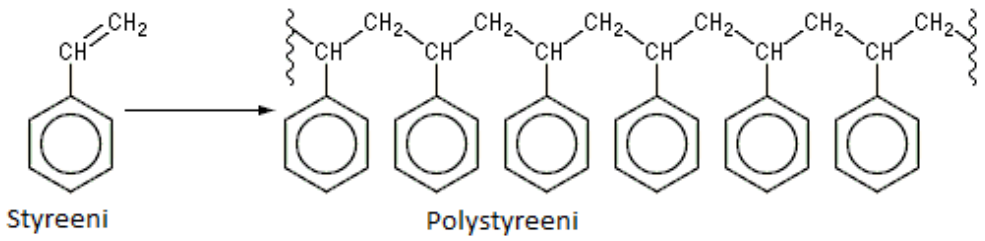
XPS (Extruded PolyStyrene) eli suulakepuristettu polystyreeni. XPS:sän valmistusprosessissa sulaan polystyreeniin liuotetaan korkeassa paineessa ponneaine, joka kaasuuntuu tullessaan ulos suuttimesta normaaliin ilmanpaineeseen synnyttäen suljettuja polystryneenisoluja. Solurakenne on yhtenäinen ja solujen halkaisija on alle 0,1 mm. FINNFOAM käyttää ponneaineena hiilidioksidia. (FINNFOAM 2012)

Ominaisuuksien puolesta XPS-levyt ovat hyviä eristeitä. Tavanomaisia käyttökohteita ovat talonrakentamisessa routasuojaus ja alapohjien lämmöneristys. Infrarakentamisen puolella levyjä käytetään muun muassa kunnallistekniikan lämmöneristeenä sekä erilaisissa routasuojauksissa.

6.2 Materiaaliominaisuudet

6.2.1 Polystyreeni

Polystyreeni on pitkäketjuinen hiilivety, jota valmistetaan aromaattisesta styreenimonomeerista, kuva 20.



Kuva 20. Polystyreenin rakenne. (Wikipedia)

Normaali polystyreeni kestää mm. emäksiä, epäorgaanisia ja orgaanisia happoja. Se ei liukene alifaattisiin hiilivetyihin, alkoholeihin, eettereihin, fenoliin, etikkahappoon tai veteen. Polystyreeni kuitenkin liukenee aromaattisiin ja kloorattuihin hiilivetyihin, ketoneihin, pyridiiniin ja rikkihiileen. Polystyreenistä valmistettujen seoksien fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet heikkenevät bensiinin, ketonien ja etanolin vaikutuksesta. (Nykänen S. 2012)

6.2.2 Lujuus

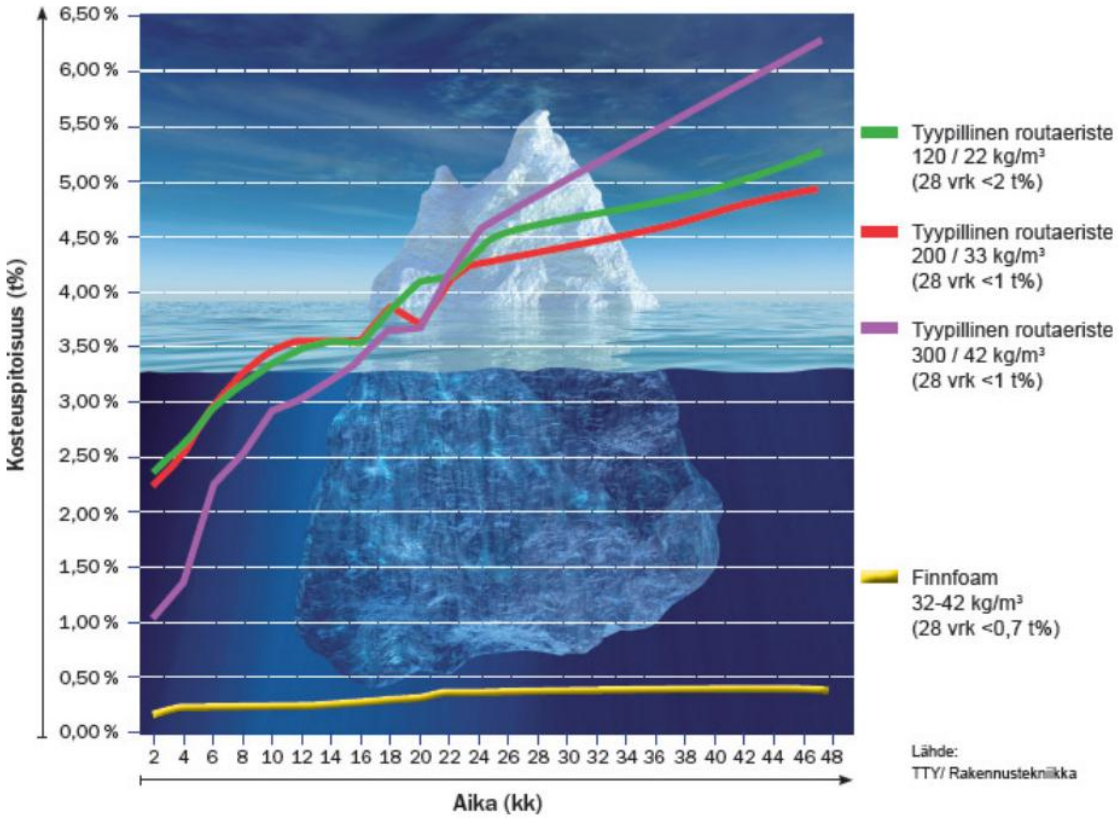
XPS-levyn solurakenteella voidaan saavuttaa korkeita puristuslujuuksia. Taulukossa 9 on esitetty FINNFOAMin valmistamien XPS-levyjen lujuusominaisuuksia. Lyhytaikainen puristuslujuus on 10% muodonmuutoksella ja pitkäaikainen puristuslujuus 2% muodonmuutoksella. Levyjen lujuus kehittyy vielä valmistuksen jälkeen. Tämä johtuu siitä, että ponneaineena käytetty hiilidioksidin diffuusio ulos solusuista on suurempaa kuin sinne sisään diffusoituvan ilman määrä, jolloin valmistukseen jälkeen soluissa vallitsee hetkellisesti alipaine. (FINNFOAM 2012)

Taulukko 9. XPS-levyjen lujuusominaisuuksia. (FINNFOAM 2011)

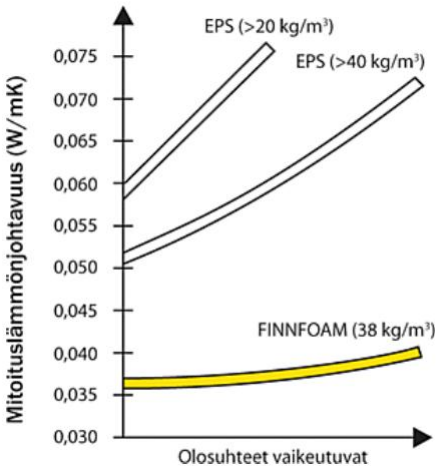
Lujuusominaisuudet	F-300	F-400	F-500	F-700
Lyhytaikainen puristuslujuus 6 kk (kPa)	300	400	500	700
Lyhytaikainen puristuslujuus 45 vrk (kPa)	250	300	400	500
Pitkäaikainen puristuslujuus (kPa)	150	200	250	300
Kimmomoduli (kPa)	15000	25000	30000	40000
Leikkauslujuus (kPa)	300	300	300	300
Taivutuslujuus (kPa)	500	500	500	500

6.2.3 Lämmöneristävyys

XPS-levyn alhainen ilmanläpäisevyys sekä ilmatäytteiset suljetut solut tekevät materiaalista hyvän lämmöneristeen. Maa-ja pohjarakentamisessa käytetyt materiaalit joutuvat usein suuremmalle kosteusrasitukselle kuin esimerkiksi rakennuksissa käytetyt materiaalit. Kosteuden imeytyminen materiaalin heikentää sen lämmöneristyskykyä. XPS-materiaalin veden imeytyvyys on alhainen verrattuna samasta materiaalista eri valmistustekniikalla valmistettuun EPS:sään. EPS valmistetaan paisuttamalla polystyreeniä. Kuvassa 21on esitetty Tampereen teknillisen yliopiston tekemän vedenimeytyvyys kokeen tuloksia. Kuvassa 22 on VTT:n tekemä tutkimus routaeristeen lämmönjohtavuuden muutoksista olosuhteiden muuttuessa. (FINNFOAM 2012)



Kuva 21. XPS ja EPS levyjen vedenimeytyvyyskoe.(FINNFOAM 2012)



Kuva 22. Routaeristeen toiminta kosteissa olosuhteissa.(FINNFOAM 2012)

XPS:sän vedenimeytyvyys on huomattavasti pienempi kuin EPS:sän. Kuvista 21 ja 22 voidaan päätellä, että XPS soveltuu paremmin lämmöneristeenä kohteisiin, missä kosteuskuorma on suuri.

6.2.4 Pitkäaikaiskestävyys

XPS on materiaalina pitkäikäinen. Se ei lahoa tai liukene veteen. Heikkous kadun päällysrakenteessa on se, että se ei kestä joitain orgaanisia liuottimia kuten bensiiniä. Liuottimien pääsy materiaaliin on kuitenkin hyvin epätodennäköistä. XPS-levyn vedenimeytyvyys on vähäistä, joten sen lämmöneristävyys ominaisuudet säilyvät vaikeissakin olosuhteissa mitoitusiän ajan.

6.3 Kierrätys

Materiaalin kierrätys

FINNFOAM käyttää 99,8 % XPS-levyjen viimeistelystä syntyvästä jätteestä, joka muuten menisi kaatopaikalle. Viimeistelystä syntyvä puru sulatetaan uudestaan ja siitä tehdään muovigranulaatteja, jotka voidaan käyttää uusien levyjen valmistuksessa. (Asso Erävuoma 2012.)

Katurakenteesta poistettavat levyt voidaan rouhia ja käyttää uusien levyjen valmistuksessa, mikäli ne saadaan kaivettua rakenteesta riittävän puhtaina. Ylimääräiset epäpuhtaudet, kuten murske, tukkivat kierrätysjärjestelmän suodattimet jolloin kierrätysprosessi ei ole enää taloudellisesti kannattavaa. (Henri Nieminen 2012.)

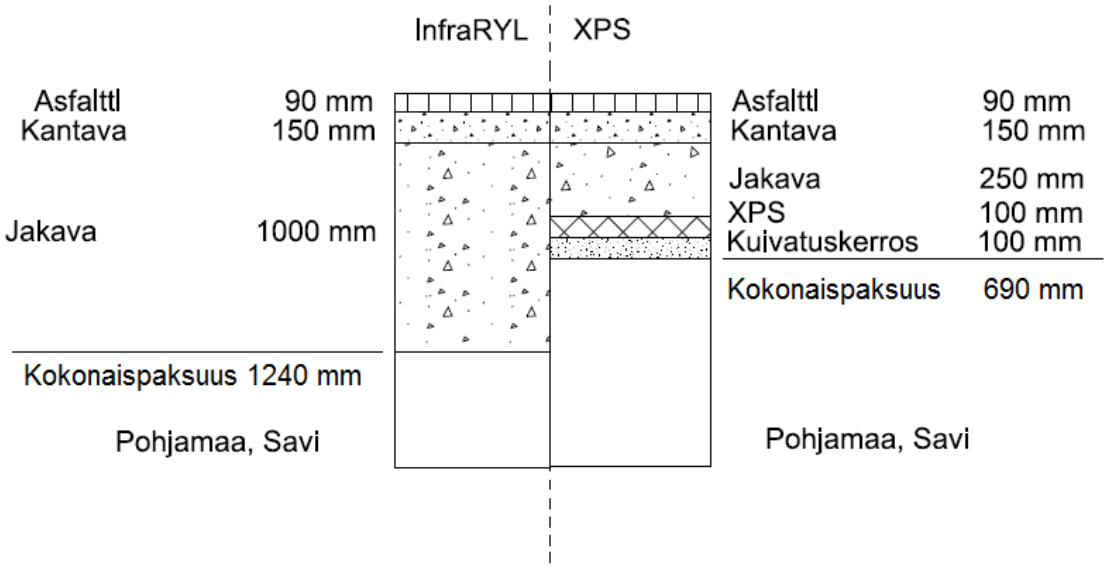
Materiaalin uudelleen käyttö

XPS-levyjä voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi meluesteiden rakentamisessa, pihatäyttöjen keventeinä sekä muissa kohteissa, joissa levyn vähäiset vauriot eivät ole ongelma eikä suunnittelukriteerit ole yhtä tiukkoja kuin esimerkiksi katurakenteessa. Levyjen uudelleenkäyttökohteita ei tiettävästi ole vielä tehty Suomessa. Tämä voi johtua siitä, ettei materiaalia ole vielä käytetty laajamittaisesti maa- ja pohjarakentamisessa.

7 XPS-rakenteen mitoitus

7.1 Mallinnettavat rakenteet ja mitoitusmenetelmät

Mitoitus rajattiin koskemaan vain yhtä XPS-rakennetta ja yhtä pohjamaata. Vertailurakenteena oli InfraRYLin mukainen rakenne, kuva 23. Mitoitus tehtiin koskemaan katuluokkaa 4 ja pohjamaaluokkaa G. XPS-rakenteen kerrospaksuuksiin vaikuttivat eristeen aiheuttama kadun pinnan liukkausvaara, routasuojaus sekä kokonaispaksuuden pienentäminen verrattuna InfraRYLin mukaiseen rakenteeseen. XPS-rakenteen kokonaispaksuus on 690 mm ja InfraRYL-rakenteen 1240 mm. Eli XPS-rakenne on noin puoli metriä ohuempi. Mitoituksissa käytetyt XPS-levyjen tuotenimet ovat F400 ja F300.



Kuva 23. Kuormituskestävyysmitoituksessa vertailtavat rakenteet.

Päällysrakenteen mitoitus tehtiin käyttäen Odemarkin mitoitusyhtälöä, APAS-monikerroslaskentaohjelmaa sekä PLAXISta. Koska PLAXIS ei ole päällysrakenteen mitoitusohjelma, oli PLAXIS mitoitukseen yhdistettävä APAS-ohjelman kestoikä funktioita.

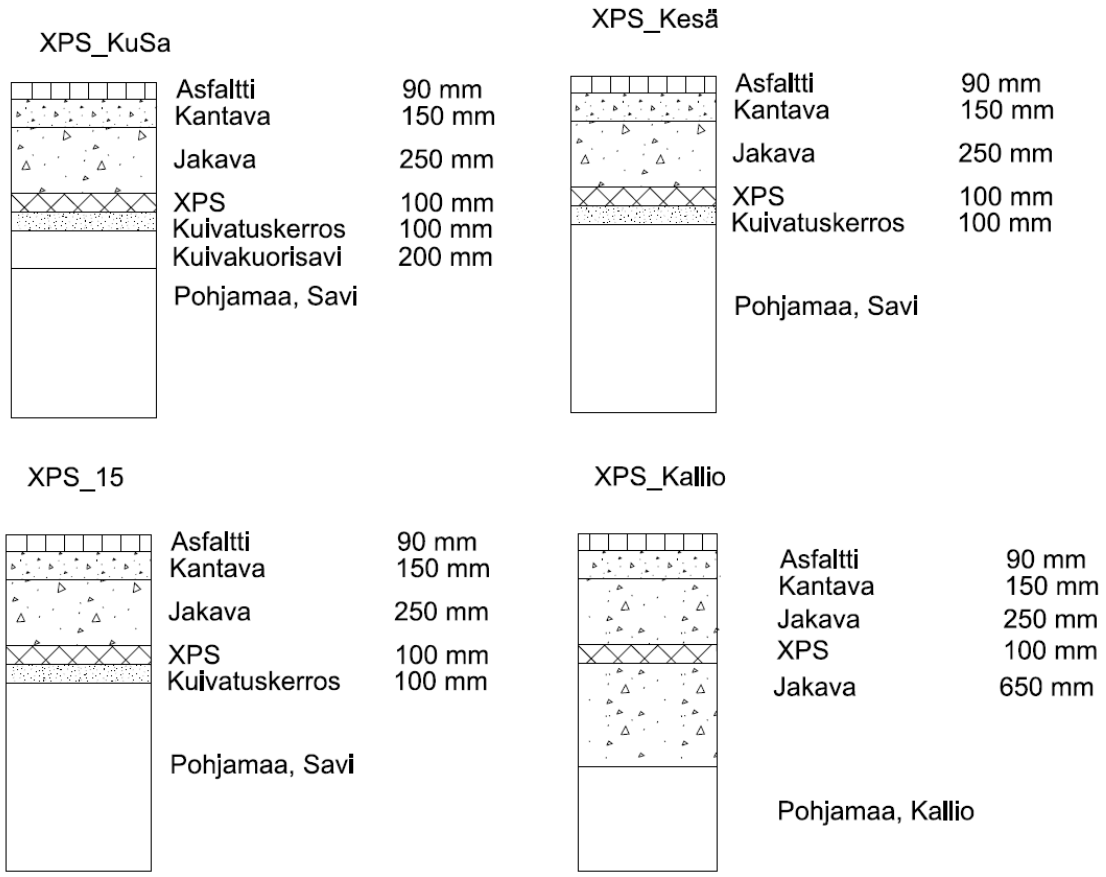
Primaarisia konsolidaatiopainumia tarkasteltiin vesipitoisuusmenetelmällä. Vertailtaville rakenteille laskettiin kokonaispainumia eri vesipitoisuus ja savikerrospaksuuksilla.

Routimista tarkasteltiin kahdella menetelmällä. Ensin laskettiin roudan tunkeutumissyvyys Talonrakennuksen routasuojaus ohjeen mukaisesti. Lisäksi laskettiin routanousua Tiehallinnon ohjeen mukaisesti routaturpoama-kertoimen avulla.

Kuvan 23 mukaisten rakenteiden vertailun lisäksi tehtiin muita laskelmia kuvan 24 mukaisille rakenteille PLAXIksella XPS-rakenteen toimivuuden tarkastamiseksi. Taulukossa 10 on esitetty tehdyt laskelmat selityksineen. Laskelmilla haluttiin selvittää XPS-levyyn kohdistuvat maksimikuormitukset, levyn jäykkyyden tarve, kuivakuorisaven sekä vuodenaikojen vaikutus rakenteen toimintaan.

Taulukko 10. PLAXIksella mallinnettavat rakenteet.

Rakenne	Kuvaus	Mitoituksen tarkoitus
InfraRYL	InfraRYLin mukainen päällysrakenne katuluokassa 4, pohjamaaluokka G	Nykyohjeiden mukainen rakenne, johon XPS rakenteita verrataan.
XPS	Kuvan 23 mukainen XPS-rakenne	Vaihtoehtoinen rakenne.
XPS_KuSa	Sama rakenne kuin XPS, mutta pohjamaan pinnassa on 200 mm kuivakuorisavea, jonka moduuli on 20 MPa	Ohuen kuivakuorisavikerroksen vaikutus muodonmuutoksiin.
XSP_15	Muuten sama rakenne kuin XPS, mutta XPS-levyn moduuli on pienentynyt 24--> 15 MPa	XSP-levyn jäykkyyden vaikutus muodonmuutoksiin.
XPS_Kesä	Sama rakenne kuin XPS, mutta asfaltin moduuli pienentynyt 4200--> 500 MPa ja pohjamaan moduuli kasvanut 5-->10 MPa	Vuodenaikojen vaihteluiden vaikutus muodonmuutoksiin.
XPS_Kallio	Sama rakenne kuin XPS, kuivatuskerros jätetty pois, pohjamaa on kalliota ja asfaltin moduuli laskenut 4200 --> 500 MPa	XPS-levyyn kohdistuva maksimi kuormitus.



Kuva 24. PLAXIS-mallinuksen XPS-rakenteet ja niiden kerrospaksuudet.

7.2 Odemarkin mitoitusyhtälö

Taulukossa 11 on esitetty Odemarkin mitoitusmenetelmässä käytetyt materiaalien parametrit. Parametrit ovat peräisin InfraRYListä. (InfraRYL 2010)

Taulukko 11. Odemarkin mitoitusyhtälössä käytetyt parametrit.

Parametrit	Moduuli	
Päällyste	2500	MPa
Kantavan kerroksen murske	300	MPa
Jakavan kerroksen murske	200	MPa
XPS	24	MPa
Kuivatuskerroksen hiekka	50	MPa
Pohjamaa	5	MPa

Taulukossa 12 on laskettu kuvan 23 InfraRYLin mukaiselle rakenteelle ja taulukossa 13 kuvan 23 mukaisen XPS-rakenteelle kantavuudet sitomattoman kantavan sekä päällysteen päältä Odemarkin mitoitusyhtälöllä.

Taulukko 12. InfraRYLin, katuluokka 4 ja pohjamaaluokka G, mukaisen rakenteen kuormituskestävyysmitoitus Odemarkin mitoitusyhtälöllä.

Lähtötiedot

Pohjamaaluokka	G	-
Pohjamaan kantavuus	5	MPa
Tavoitekantavuus, päällysteen päältä	250	MPa
Tavoitekantavuus, sitomattoman päältä	148	MPa

Rakennekerrokset

Materiaali		E_{mat}, MPa	E_{lasku}, MPa	h, m	E_P, MPa	$E_i/E_{(i-1)}$	n
Asfalttibetoni	AB	2500	2500	0,09	268	15,4	20
Kalliomurske 0…45, Kantava	KaM 0/45	300	300	0,150	162	2,5	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	200	0,250	119	2,9	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	171	0,250	68	7,0	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	72	0,250	29	16,7	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	30	0,250	12	40,0	6

Tulokset

Rakennekerroksien kokonaispaksuus, mm	1240	
Kantavuuus sitomattoman päältä, MPa	162	OK
Kantavuus asfaltin päältä MPa	268	OK

Taulukko 13. XPS-rakenteen mitoitus käyttäen Odemarkin mitoitusyhtälöä.

Lähtötiedot		
Pohjamaaluokka	G	-
Pohjamaan kantavuus	5	MPa
Tavoitekantavuus, päällysteen päältä	250	MPa
Tavoitekantavuus, sitomattoman päältä	148	MPa

Rakennekerrokset

Materiaali		E_{mat}, **MPa**	E_{lasku}, **MPa**	**h, m**	E_P, **MPa**	$E_i/E_{(i-1)}$	**n**
Asfalttibetoni	AB	2500	825	0,09	72	60,6	20
Kalliomurske 0…45, Kantava	KaM 0/45	300	140	0,150	41	12,9	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	87	0,125	23	13,7	6
Kalliomurske 0…63, Jakava	KaM 0/63	200	55	0,125	15	22,0	6
Suulakepuristettu polystyreeni	XPS 400	24	24	0,100	9	3,4	10
Hiekka	Hk	50	30	0,100	7	10,0	6

Tulokset

Rakennekerroksien kokonaispaksuus, mm	690	
Kantavuuus sitomattoman päältä, MPa	41	Riittämätön
Kantavuus asfaltin päältä MPa	72	Riittämätön

Taulukosta 13 nähdään, että Odemarkin mitoitusyhtälön, kaava 4, lisäehdon yksi ($E \leq 6 \cdot E_A$) takia laskennassa käytetyt moduulit ovat huomattavasti pienempiä kuin materiaalien ilmoitetut moduulit. Ilmoitetut moduulit ovat materiaalien moduuleja optimi tiiveystilassa. Pehmeän kerroksen päälle ei pystytä tiivistämään normaaliolosuhteissa materiaalia optimitiiveyteen, jolloin moduulin pienentäminen jonkin verran on tarpeellista laskennan luotettavuuden säilyttämiseksi. Kirjallisuudesta ei löytynyt perusteita, mistä $E \leq 6 \cdot E_A$ määräytyy.

InfraRYLin mukainen rakenne oletetusti täyttää katuluokalle asetetut kantavuusvaatimukset. XPS-rakenteen laskettu kantavuus ei täytä kantavuusvaatimuksia sitomattoman kantavan (148 MPa) eikä päällysteen (250 MPa) päältä. Kantavuus sitomattomien kerroksien päältä on vain 41 MPa ja päällysteen päältä 72 MPa, kun taas InfraRYLin mukaisella rakenteella vastaavat kantavuudet ovat 162 MPa ja 268 MPa.

7.3 Kuormituskertaluku

Liikennekuormitus on satunnaisessa järjestyksessä, satunnaisin aikavälein sekä erisuurilla kuormilla tapahtuvaa dynaamista kuormitusta. Kadulla liikkuvat ajoneuvot vaihtelevat henkilöautoista kuorma-autoihin, joiden kuormitus taas vaihtelee huomattavasti riippuen niiden kuormausasteesta.

Liikennekuormitus jakautuu kadun poikkileikkauksen suhteen epätasaisesti, keskittyen ajolinjoille. Kapeilla kadulla ajolinjojen keskittyminen kapealle sektorille on voimakkaampaa kuin leveillä kaduilla. (Ehrola 1996 s. 31 – 32). Tämä otetaan huomioon laskettaessa kuormituskertalukua KKL leveyskertoimella L, taulukko 15.

Tässä työssä haluttiin määrittää rakenteille laskennallinen kestoikä, vaikka tarkkaa liikennemäärää ei ole käytettävissä. InfraRYL ei erikseen ilmoita katuluokituksessa raskaanliikenteen osuutta, joka vaikuttaa yksinomaan kuormituskertaluvun laskemiseen.

Vuotuinen KKL laskettiin kaavalla 6 käyttäen taulukon 14 mukaisia lähtöolettamuksia:

Taulukko 14. KKL laskemisen parametrit.

Katuluokka	4
KVL_päivä (ajon. / vrk)	2500
KVL_päivä / kaista (ajon. / vrk)	1250
Rask osuus (%)	5
Yhdistelmien osuus raskaista (%)	10
L (leveyskerroin taulukko 15)	2,0

$$KKL_{KAISTA} = L \cdot (2.9 \cdot KA_{YHD} + 0.8KA_{MUU}) \cdot 365 \qquad (6)$$

jossa
KA_{YHD} on ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa
KA_{MUU} on muiden raskaiden ajoneuvojen määrä vuorokaudessa
L on leveyskerroin, taulukko 15
(Tiehallinto 2004)

Taulukko 15. Kaistan leveyskertoimen riippuvuus kaistan leveydestä ja sisäluiskan kaltevuudesta. (Tiehallinto 2004)

Kaistan ja viereisen pientareen yhteisleveys 1), 2)	Tien sisäluiskan kaltevuus 3)	Leveyskerroin L
2,5 ... 3,49 m	1 : 2 ... 1 : 2,5	2,8
2,5 ... 3,49 m	1 : 3 ... 1 : 4	2,0
3,5 ... 5 m	1 : 3 ... 1 : 4	1,4
yli 5 m		1

1) Rampeilla otetaan huomioon leveämpi piennar.
2) Jos kaistan kummallakin puolella on ajokaista, sovelletaan taulukon alinta riviä.
3) Kaiteellinen poikkileikkaus, jossa on kaidelevennys ja luiskakaltevuus 1 : 1,5 vastaa luiskankaltevuutta 1:3 (L ≤ 1,4).

Vuotuiseksi kuormituskertaluvuksi (KKL) katuluokassa neljä saatiin noin **46 000** joka vastaa standardiakselin ylityskertojen lukumäärää. Tämä voidaan ilmaista myös niin, että kadulla ajaa noin 10 minuutin välein yksi 10 tonnin akselikuormalla oleva kuormaauto vuorokauden ympäri.

7.4 APAS

Myös APAS-mitoituksessa vertailtavat rakenteet olivat kuvan 23 mukaiset. APAS-mitoituksen parametrit eroavat Odemarkin mitoitusyhtälön vastaavista. Taulukossa 16 on esitetty APAS-mitoituksessa käytetyt materiaalien moduuliarvot. Liitteessä 1 on esitetty kattavampi taulukko parametreista.

Taulukko 16. APAS-mitoituksen parametrit.

	E-moduuli, MPa	
Kerros	**InrfaRYL**	**XSP**
Asfaltti AB(B70/100)	3650	3650
Asfaltti AB(B50/70)	4175	4175
Kantavan kerroksen murske	284-336	270-324
Jakavan kerroksen murske	127-191	129-177
XPS	-	24
Hiekka	-	50
Pohjamaa	5	5

APAS-ohjelmassa oletusarvoisesti käytetään mitoituskuormana 100 kN paripyöräakselia. Tässä työssä käytetään mitoituskuormana 100 kN akselikuormaa ja Single rengastyyppiä, jotta APAS- ja PLAXIS-mitoitus olisivat vertailukelpoisia. PLAXIS-ohjelman pyörähdyssymmetrisellä geometrialla saadaan tarkemmin mallinnettua yksittäinen rengas kuin paripyörä.

Jännitys-muodonmuutos käyttäytyminen laskettiin käyttäen APAS-ohjelman STRESS-laskentatoimintoa. STRESS- laskentatoiminnossa sitomattomien kerrosten moduulit määräytyvät jännitystilan mukaan siten, että karkearakeisilla materiaaleilla moduuli yleensä kasvaa ja hienorakeisilla pienenee jännitystilan kasvaessa (APAS_3 mitoitusohjelman käyttöohje).

STRESS-laskentatoiminto ei ota huomioon pehmeän kerroksen päällä olevan kerroksen moduulin pienenemistä. APAS-ohjelman mitoitustoiminto pienentää murskeiden moduuleja säännön $E \geq 4 \cdot E_A$. Mitoitus-toiminnolla lasketut jännitykset ja muodonmuutokset eivät olleet järkevällä tasolla moduulien pienenemisen vuoksi. Siksi mitoitus tehtiin manuaalisesti. STRESS-ohjelmalla laskettiin muodonmuutokset, jotka sijoitettiin APAS-ohjelman kestoikäfunktioihin.

STRESS-laskentatoiminnolla laskettaessa InfraRYLin mukaisella rakenteella pohjamaan päälle tulevan jakavan kerroksen murskeen moduuli on yli 25-kertainen suhteessa pohjamaan moduuliin. XPS-rakenteella kuivatuskerroksen hiekan moduuli on $E_{hiekka} = 10 \cdot E_{pohjamaa}$. XPS-levyn päälle tulevan jakavan kerroksen murskeen moduuli on $E_{jakava} < 6 \cdot E_{XPS}$. Tuloksien tarkkuuden parantamiseksi tulisi moduuleja pienentää pohjamaan yläpuolisissa kerroksissa.

Taulukossa 17 on esitetty APAS-mitoituksen tulokset. Suurin ero rakenteilla on pohjamaan kestävyydessä. XPS-rakenteella pohjamaan pinnan pystymuodonmuutos on melkein 3,5-kertainen suhteessa InfraRYLin mukaiseen rakenteeseen. Tämä johtuu pääosin rakenteiden paksuuserosta.

Taulukko 17. APAS-mitoituksen lähtötiedot ja tulokset.

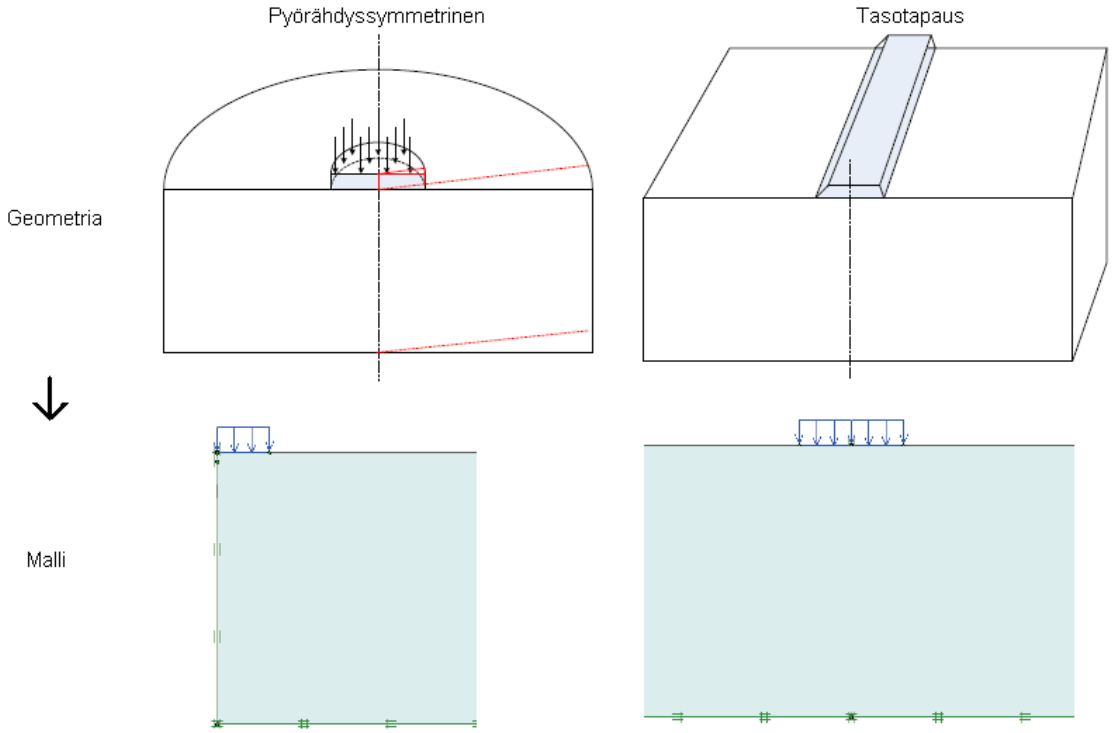
Lähtötiedot		
Katuluokka	4	
Pohjamaaluokka	G	
KVL_päivä	2500	
Rask osuus (%)	5	
Yhdistelmien osuus raskaista (%)	10	
L	2,0	
KKL_vuosi / ajokaista	**46081**	
Asfaltin moduuli, MPa	4175	
Muodonmuutokset	**InfraRYL**	**XPS**
asfaltin alapinnan venymä, µm/m	299	330
Kantavan kerroksen pystymuodonmuutos, µm/m	983	1006
Jakavan kerroksen pystymuodonmuutos, µm/m	789	838
Kuivatuskerroksen pystymuodonmuutos, µm/m	-	548
Pohjamaan pinnan pystymuodonmuutos, µm/m	380	1297
XPS kerroksen pinnan pystyjännitys, kPa	-	15
Laskennallinen kestoikä, vuotta	**InfraRYL**	**XPS**
Asfaltin kestoikä	14	9
Kantavan kerroksen murskeen kestoikä	69	60
Jakavan kerroksen murskeen kestoikä	265	183
Hiekan kestoikä	-	84
Pohjamaan kestoikä	69	1

Kummankaan rakenteen asfalttikerros ei täytä kadun päällysteelle yleisesti asetettua 20 vuoden käyttöikää. InfraRYLin mukainen rakenteen päällysteen kestoikä on 14 vuotta ja XPS-rakenteen 9 vuotta. Tämä voi selittyä sillä, että APAS on kehitetty Tiehallinnon toimesta, joka luokittelee pohjamaan moduulit asteikolla 10-280MPa, kun laskennassa käytettiin pohjamaan moduulille arvoa 5 MPa.

7.5 PLAXIS Mitoitus

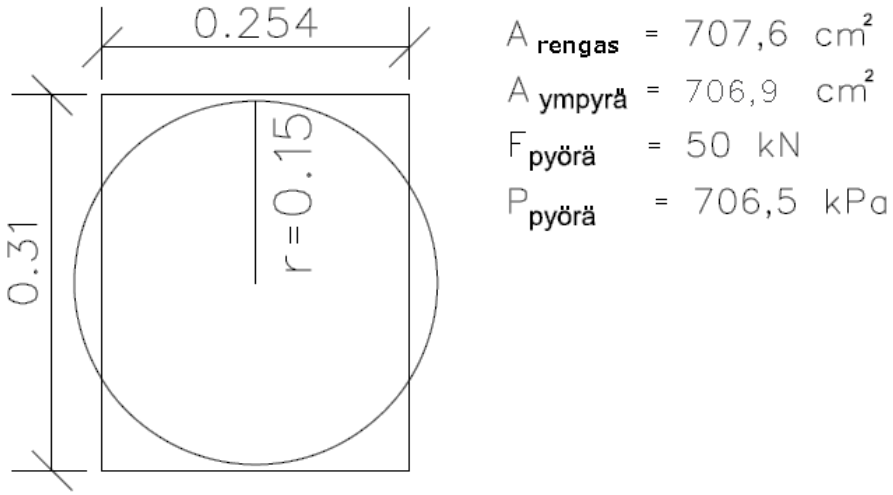
7.5.1 Lähtötiedot ja laskennan kulku

PLAXIS mitoituksessa vertailtavat rakenteet ovat samat kuin APAS mitoituksessa, kuva 21. PLAXIS ohjelmassa voidaan mallin geometriaksi valita pyörähdyssymmetrinen tai 2-ulotteinen tasogeometria, kuva 25.



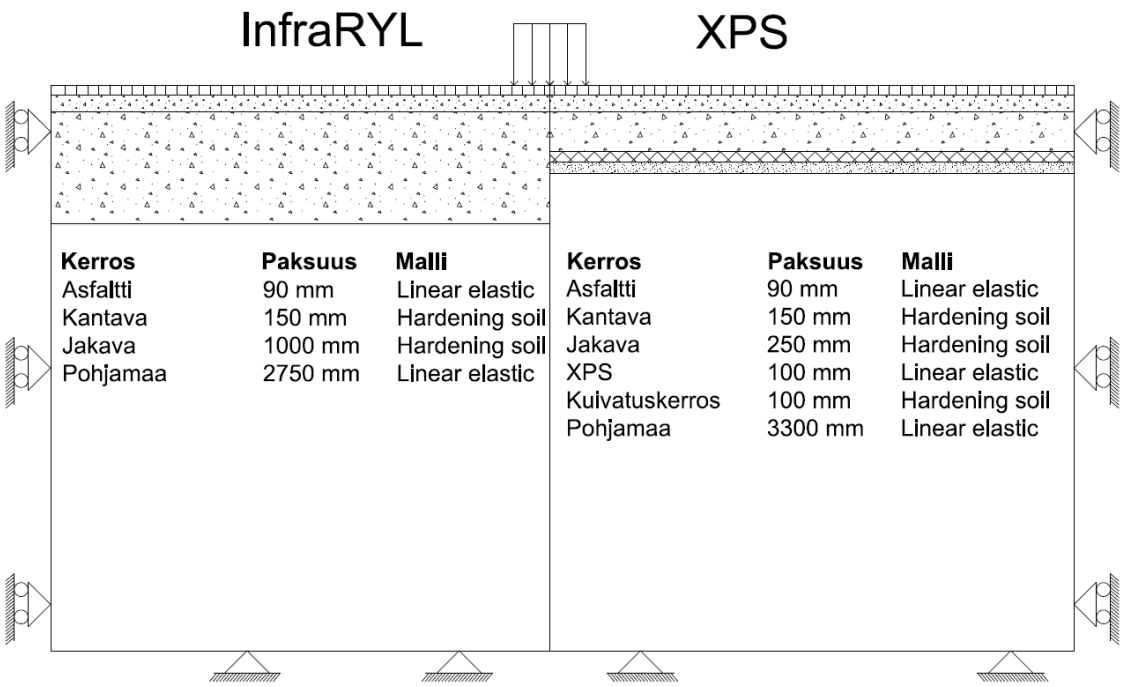
Kuva 25. PLAXIS 2D ohjelman geometria vaihtoehdot. (PLAXIS 2011)

Mitoituksessa käytettiin pyörähdyssymmetristä geometriaa, koska se soveltuu paremmin pyöräkuorman mallintamiseen. Pyöräkuormaksi valittiin sama kuin APAS-mitoituksessa, yksittäinen pyörä, kuorma 50kN ja rengaspaine 800 kPa. Kuvassa 26 on esitetty renkaan kosketuspinta-ala ja sen mallintaminen PLAXIKSEN pyörähdyssymmetriseen geometriaan. Kosketuspinta-ala ja sen muoto on peräisin VTT:llä tehdystä kokeesta, jossa mitattiin eri kuormien ja rengaspaineiden vaikutusta kosketuspinta-alaan. (Korkiala-Tanttu 2008)



Kuva 26. Yksittäisen pyörän kosketuspinta-ala ja sen mallintaminen PLAXIKSESSA. (Korkiala-Tanttu 2008)

Mitoituksessa vertailtavat rakenteet, kerrospaksuudet, reunaehdot ja materiaalimallit on esitetty kuvassa 27.



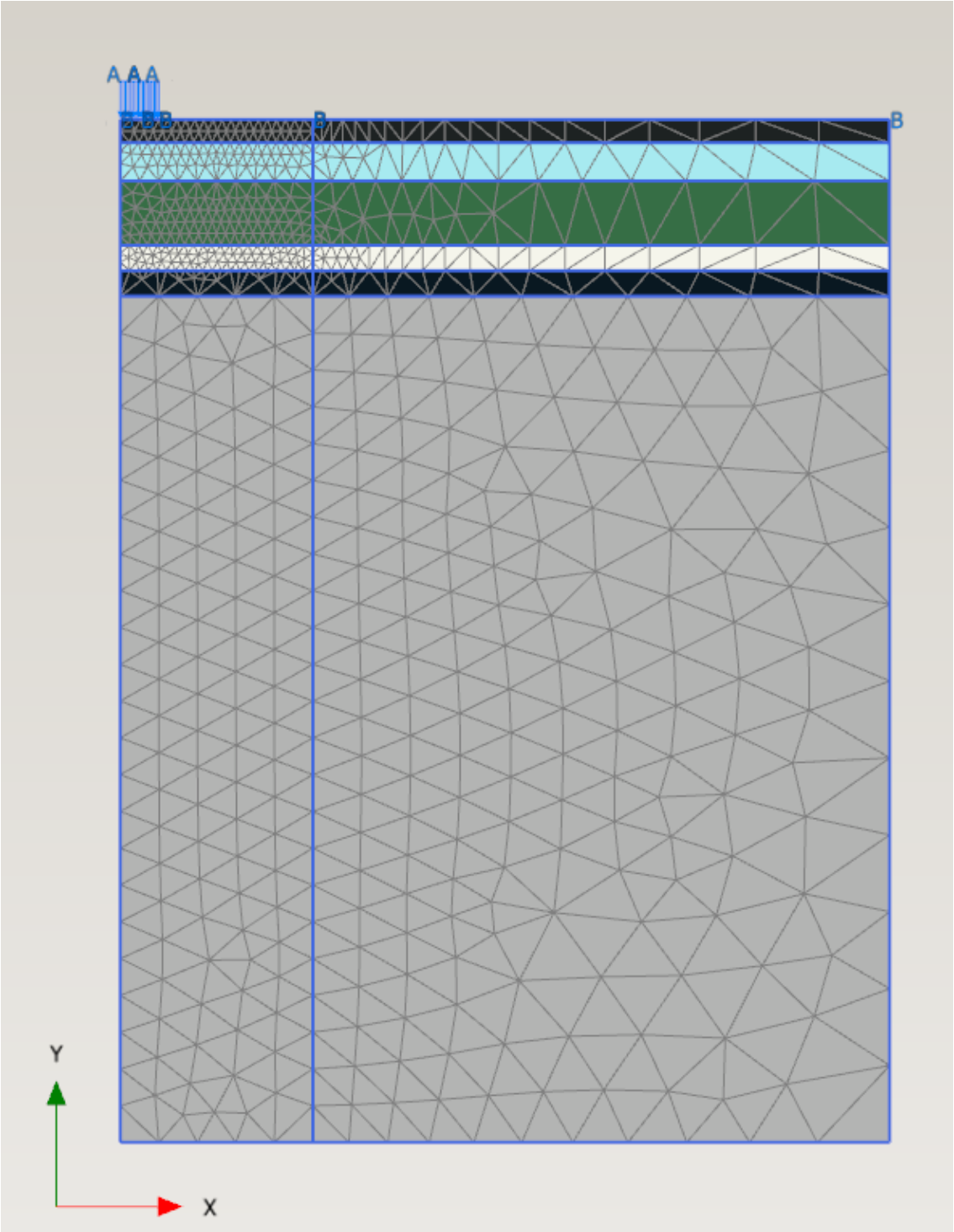
Kuva 27. Mitoituksessa vertailtavat InfraRYL- ja XPS-rakenteet, reunaehdot, kerrospaksuudet ja materiaalimallit.

Taulukossa 18 on esitetty mitoituksessa käytetyt parametrit. Sitomattomien kerrosten parametrit ovat peräisin Korkiala-Tantun väitöskirjasta vuodelta 2008.

Taulukko 18. Mitoituksessa käytetyt parametrit. (Korkiala-Tanttu 2008)

Hardening soil	Kantava	Jakava	Kuivatuskerros
E_{ur}^{ref}, MPa	750	600	420
E_{oed}^{ref}, MPa	173	130	110
E_{50}^{ref}, MPa	250	150	120
γ', kN/m^3	22	22	18
c’	20	20	15
φ’	55	50	40
Ψ	25	20	10
K_0	0,32	0,3	0,42
Linear Elastic	**Asfaltti**	**XPS**	**Pohjamaa**
E, MPa	4200	24	5
v	0,3	0,38	0,4
γ', kN/m^3	25	0,36	16

Mitoitus tehtiin 15-solmuisilla kolmioelementeillä. Kuvassa 28 on havainnollistettu elementtiverkon tiheyttä mallin eri osissa. Laskennassa pohjavedenpinta mallinnettiin riittävän alas, jolloin päällysrakenteessa ei esiinny huokosvedenpainetta.



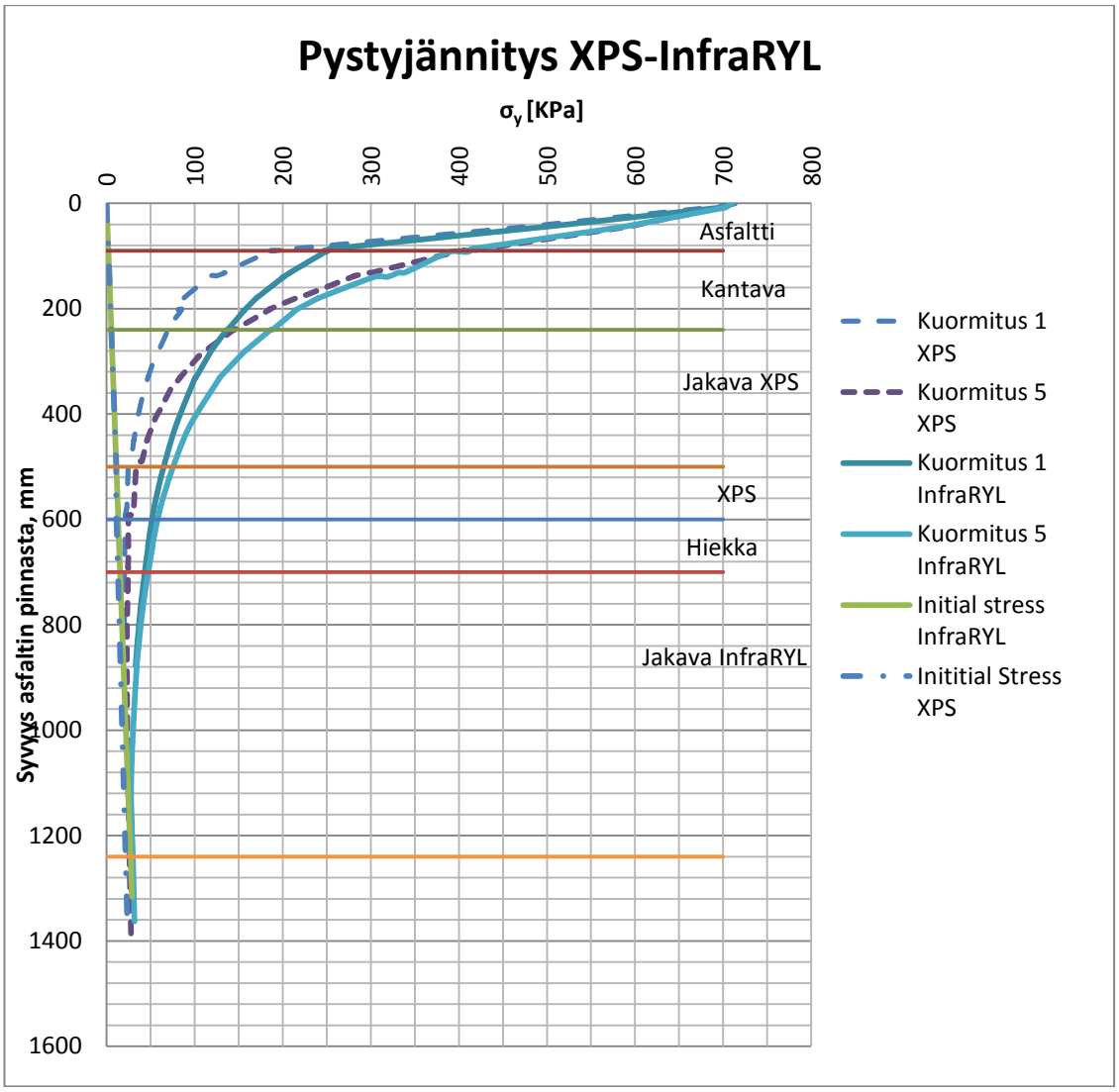
Kuva 28. Elementtiverkon tiheys XPS-rakenteen mitoituksessa.

Mallinnus koostui alkutilanteen lisäksi 15 laskentavaiheesta. Taulukosta 19 selviävät eri laskentavaiheet. Laskentavaiheet koostuivat kerrosten rakentamisesta, tiivistämisestä sekä viidestä staattisesta yhtäsuuresta kuormituksesta. Tiivistys mallinnettiin 100 kPa pintakuormana koko mallin alalle. Toistokuormituksilla haluttiin hyödyntää HS-mallin ominaisuuksia sekä tutkia sitä, miten muodonmuutokset muuttuvat kuormituskertojen lukumäärän suhteen.

Taulukko 19. XPS-rakenteen laskentavaiheet.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	N/A	K0 procedure	Unassigned
rakentaminen xps	1	0	Plastic analysis	Staged construction
rakentaminen jakava	2	1	Plastic analysis	Staged construction
rakentaminen kantava	3	2	Plastic analysis	Staged construction
rakentaminen asfaltti	4	3	Plastic analysis	Staged construction
tiivistäminen	5	4	Plastic analysis	Staged construction
tiivistäminen vaikutus	6	5	Plastic analysis	Staged construction
kuormitus 1	7	6	Plastic analysis	Staged construction
palautunut 1	8	7	Plastic analysis	Staged construction
kuormitus 2	9	8	Plastic analysis	Staged construction
palutunut 2	10	9	Plastic analysis	Staged construction
kuormitus 3	11	10	Plastic analysis	Staged construction
palautunut 3	12	11	Plastic analysis	Staged construction
kuormitus 4	13	12	Plastic analysis	Staged construction
Palautunut 4	14	13	Plastic analysis	Staged construction
Kuormitus 5	15	14	Plastic analysis	Staged construction

Kuvassa 29 on esitetty toistokuormituksen vaikutusta pystyjännityksiin. Jännityksien tai muodonmuutoksien muutos oli olematon 5 toistokuormituksen jälkeen. Tuloksissa esitetään viidennen toistokuormituksen muodonmuutos ja sen perusteella laskettu kestoikä.



Kuva 29. Toistokuormitusten vaikutus pystyjännitysten jakautumiseen kuormituksen alla.

7.5.2 Tulokset

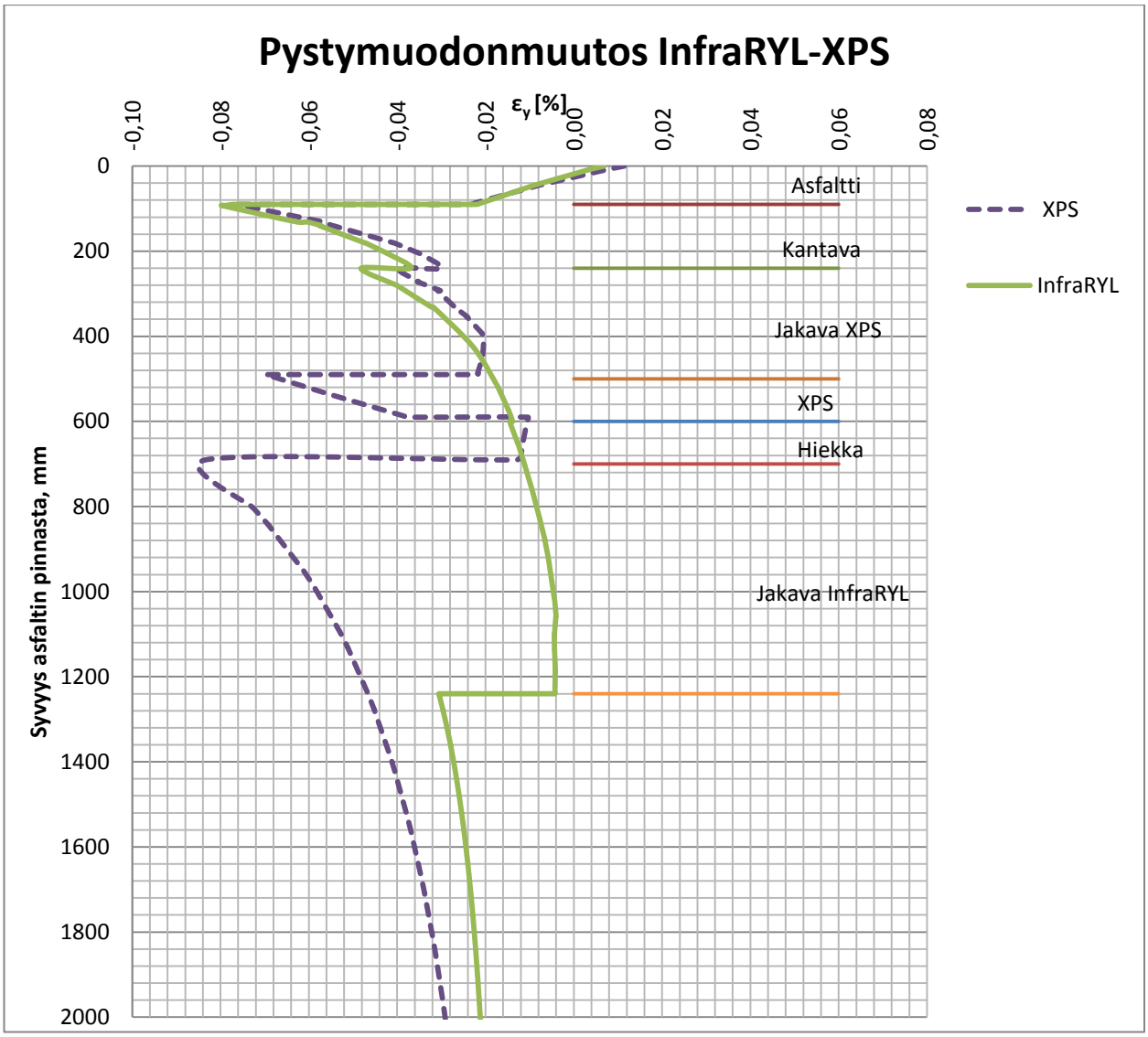
Mitoituksen tulokset on koottu taulukkoon 20. Mitoituksessa tutkittiin asfaltin alapinnan suhteellista vetomuodonmuutosta, XPS-kerroksen yläpinnan puristusjännitystä sekä sitomattomien kerrosten ja pohjamaan yläpinnan suhteellista pystymuodonmuutosta. PLAXIS-mitoituksen muodonmuutokset sijoitettiin APAS ohjelman kestoikäfunktioihin, jolloin saatiin eri kerroksille laskennallinen kestoikä. KKL on sama kuin APAS-mitoituksessa. Taulukossa 20 on esitetty PLAXIS-mitoituksen tulokset. Taulukosta nähdään, että XPS-rakenteen mitoitusikä katuluokan 4 liikennemäärillä on riittävä lukuun ottamatta pohjamaata.

Taulukko 20. PLAXIS mitoituksen tulokset.

Kerros	Asfaltti		Kantava murske		Jakava murske		Kuivatus hiekka		Pohjamaa	
Rakenne	$\varepsilon_{x,}$µS	Kestoikä	$\varepsilon_{y,}$ µS	Kestoikä	$\varepsilon_{y,}$ µS	Kestoikä	$\varepsilon_{y,}$ µS	Kestoikä	$\varepsilon_{y,}$ µS	Kestoikä
InfraRYL	170	173	800	308	480	>1000	-	-	305	164
XPS	180	134	770	244	400	>1000	104	>1000	830	3
XPS_KuSa*	175	152	755	347	390	>1000	111	>1000	408/700	52/ 6
XSP_15	185	118	760	334	412	>1000	90	>1000	821	3
XPS_Kesä	165	>1000	795	253	550	>1000	165	>1000	840	3
XPS_Kallio	90	3025	890	127	560	>1000	-	-	-	-

* Pohjamaan muodonmuutoksissa ja kestoiässä ensin esitetty luku kuvaa kuivakuoren muodonmuutosta/kestoikää ja jälkimmäinen saven.

Kuvassa 30 on esitetty XPS- ja InfraRYL-rakenteiden pystymuodonmuutokset. Kuvasta 30 ja taulukosta 20 nähdään, että XPS-kerroksen yläpuolella muodonmuutokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin InfraRYL-rakenteella, mutta XPS-rakenteella pohjamaanpinnan muodonmuutokset ovat huomattavasti suuremmat, yli 2-kertaiset. Tämä oli odotettavissa, kun rakennetta ohennetaan, niin kuormitukset pohjamaassa kasvavat.



Kuva 30. XPS- ja InfraRYL rakenteiden pystymuodonmuutokset.

XPS-levyn pintaan kohdistuva pystyjännitys liikennekuormituksen alla on esitetty taulukossa 21. Taulukosta voidaan päätellä, että levyn pintaan kohdistuvat kuormat eivät aiheuta pysyviä muodonmuutoksia levyssä.

Taulukko 21. XPS-levyyn kohdistuvat voimat ja muodonmuutokset.

	pystyjännitys yläpinnassa	kokonais-kokoonpuristuma	Pinnan muodonmuutos	Kokonais muodonmuutos
Rakenne	$\sigma_{y,}$ Kpa	$u_{y,}$ mm	$\varepsilon_{y,}$ µS	$\varepsilon_{y,}$ %
XPS	42	0,055	700	0,055
XSP_15	38	0,066	865	0,066
XPS_KuSa	48	0,055	720	0,055
XPS_Kallio	90	0,14	1576	0,14
XPS_kesä	66	0,076	980	0,076

8 Konsolidaatiopainumat

8.1 Laskennan lähtötiedot

Laskenta tehtiin InfraRYL- ja XPS-rakenteille. Laskennassa vertailtiin kokonaispainumaeroja kahden vaihtoehtoisen rakenteen välillä. Laskenta tehtiin vesipitoisuusmenetelmällä eri vesipitoisuuksilla ja savikerrospaksuuksilla. Painumat laskettiin myös uudisrakenteiselle kadulle saneerauskohteen lisäksi.

Laskenta tehtiin MS Saarelman PAINU-ohjelman versiolla 7.3. PAINU-ohjelma perustuu Helenelundin vesipitoisuusmenetelmään, kaava 7. (Länsivaara, 2000)

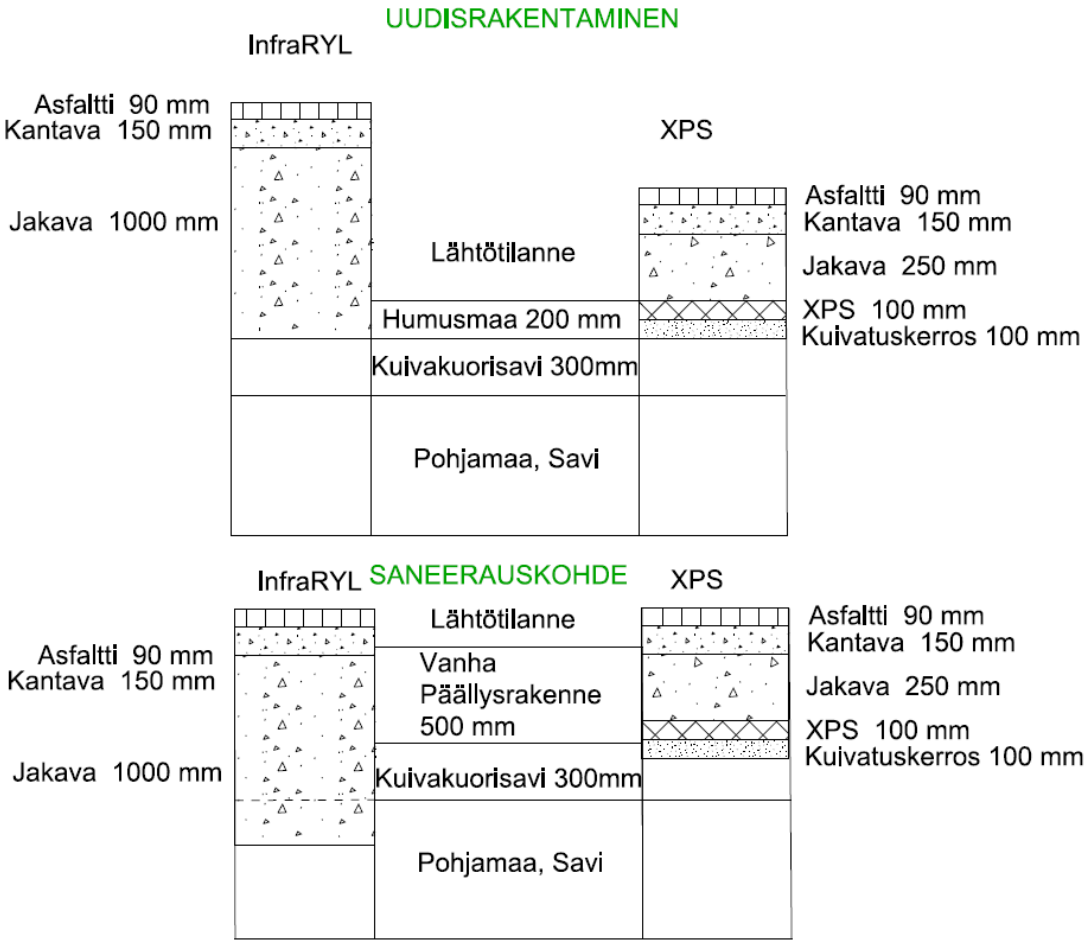
$$C_c = k_c \cdot \sqrt{w^3} \qquad (7)$$

jossa,

C_c on kokoonpuristuvuusindeksi

w on vesipitoisuus

k_c kerroin useimmiten noin 0,85, vaihtelu yleensä 0,5 <k_c <1,5



Kuva 31. Konsolidaatiopainumat laskettiin kuvan mukaisilla rakenteilla.

Painumalaskennassa käytetyt olettamukset on esitetty kuvassa 32. Pohjamaan päälle mallinnetaan 300 mm paksu kuivakuorisavikerros parantamaan laskennan todenmukaisuutta. Kuivakuorisaven vesipitoisuudeksi oletetaan 20 % ja tilavuuspainoksi 17 kN/m^3

sekä ylikonsolidaatiojännitystä 30 kPa. Pohjavedenpinta oletettiin kuivakuoren alapintaan. Kuivakuoren alapuolisen saven tehokkaaksi tilavuuspainoksi oletettiin 6 kN/m^3.

Uudisrakentamisessa kuormitus määräytyy poistettavasta humuskerroksesta ja pohjamaan päälle rakennettavien rakennekerrosten painosta. XPS-rakenne aiheuttaa maaperään noin 10 kPa kuormituksen ja InfraRYLin mukainen rakenne melkein 2,5-kertaisen kuormituksen eli noin 25 kPa, taulukko 22.

Saneerauskohteessa vanhan päällysrakenteen paksuudeksi oletetaan 500 mm. Noin 19 kN/m^3 tilavuuspainolla vanhan päällysrakenteen poistosta seuraa 9,5 kPa suuruinen kompensaatiokuorma. Tällöin XPS-rakenteesta aiheutuva lisäkuorma maaperään on 4,0 kPa ja InfraRYL rakenteesta 9,1 kPa. InfraRYL rakenne kuormittaa maaperää yli 2-kertaisesti verrattuna XPS-rakenteeseen, taulukko 22.

Taulukko 22. Painumalaskennan kuormien määräytymisperusteet.

Uudisrakentaminen			
InfraRYL			
Kerros	h, mm	Tilavuus paino, kN/m^3	Kuorma, kPa
Humusmaan poisto	-200	16	-3,2
Jakavakerros	1000	22	22
Kantavakerros	150	22	3,3
Asfaltti	90	25	2,3
Kuormitus yhteensä			**24,4**
XPS			
Kerros	h, mm	Tilavuus paino, kN/m^3	Kuorma, kPa
Humusmaan poisto	-200	16	-3,2
Kuivatuskerros	100	18	1,8
XSP	100	0,36	0,036
Jakavakerros	250	22	5,5
Kantavakerros	150	22	3,3
Asfaltti	90	25	2,3
Kuormitus yhteensä			**9,7**
Saneeraus			
	h, mm	Tilavuus paino, kN/m^3	Kuorma, kPa
Vanha päällysrakenne	-500	19	**-9,5**
		InfraRYL	**XPS**
Kuorman lisäys, kPa		**9,1**	**4,0**

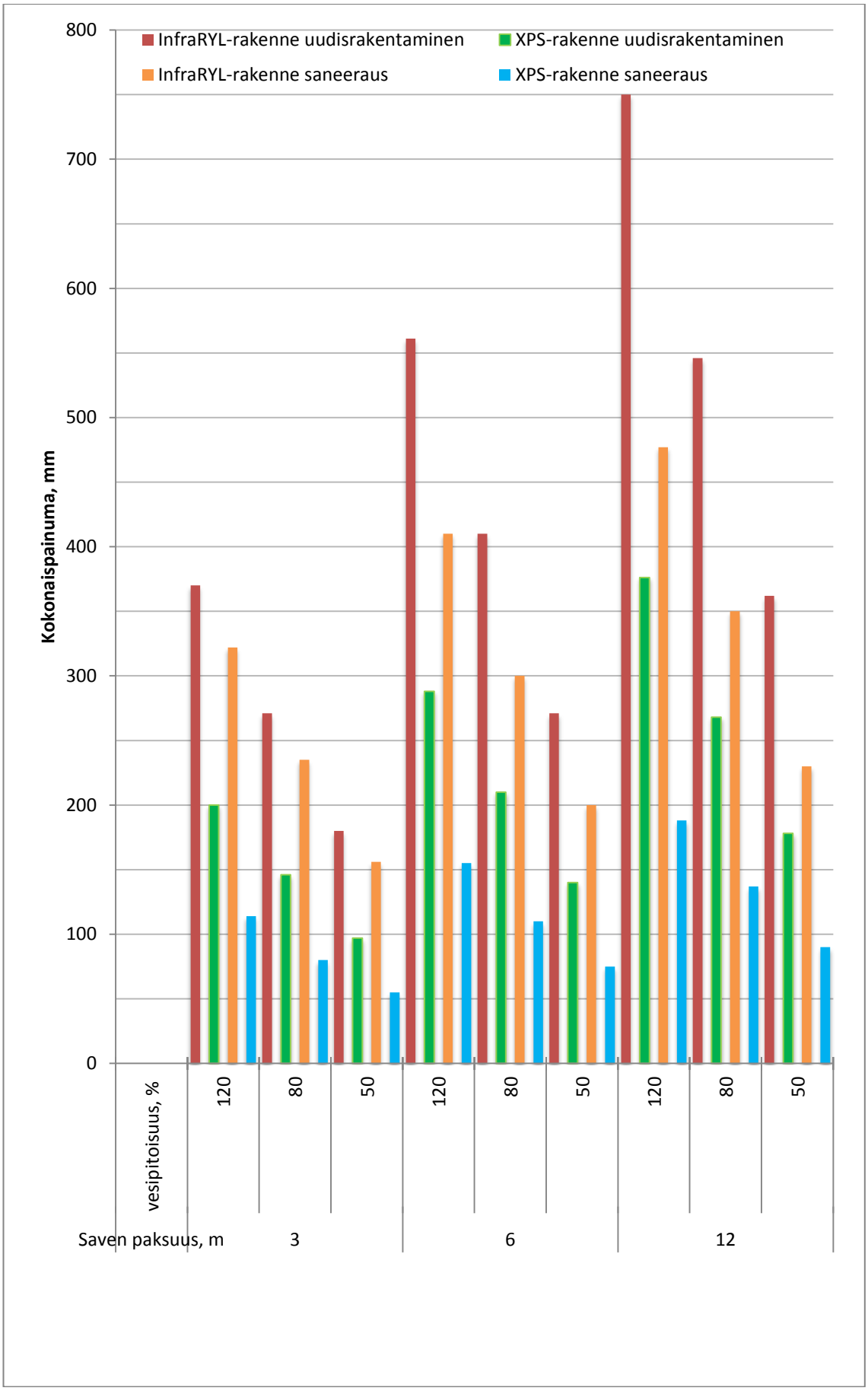
8.2 Tulokset

Painumalaskennan tulokset on esitetty taulukossa 23 ja kuvassa 33. Tulokset ovat kokonaispainumia. Painumat on laskettu vesipitoisuusmenetelmällä, siksi ne soveltuvat lähinnä painumien alustaviin tarkasteluihin (Länsivaara 2000), suuruusluokan tarkistamiseen sekä rakenteiden painumien vertailuun. Painumien suuruus tulee aina laskea tapauskohtaisesti pohjautuen pohjatutkimuksiin ja kuormitushistoriaan.

Taulukko 23. Painumalaskennan tulokset.

		KOKONAISPAINUMAT, mm			
		Rakenne			
	Rakennusvaihe	**Uusi**		**Saneeraus**	
Saven paksuus, m	**vesipitoisuus, %**	InfraRYL	XPS	InfraRYL	XPS
3	120	370	200	322	114
	80	271	146	235	80
	50	180	97	156	55
6	120	561	288	410	155
	80	410	210	300	110
	50	271	140	200	75
12	120	750	376	477	188
	80	546	268	350	137
	50	362	178	230	90

XPS-rakenteella uudisrakentamisessa painumat ovat noin 45 - 50 % pienemmät ja saneerauskohteessa noin 60 - 65% pienemmät kuin InfraRYL-rakenteella. Taulukossa 23 on väreillä havainnollistettu painuman suuruutta siten, että 200 mm painuma on esitetty keltaisella värillä ja sitä pienemmät painumat vihreällä sävyllä, sävyn vahvistuessa painuman pienentyessä. Yli 200 mm painumat on taas esitetty punaisella sävyllä, sävyn vahvistuessa kun painumat kasvavat.

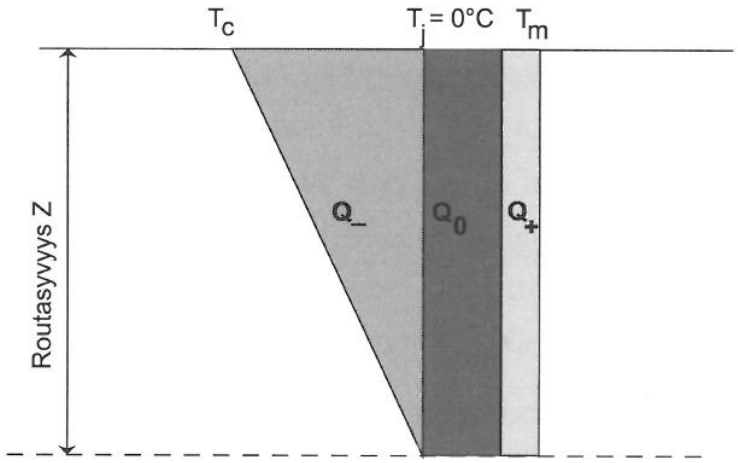


Kuva 32. Painumalaskennan tulokset.

9 Routamitoitus

9.1 Roudan syvyys

Roudan tunkeutumissyvyys laskettiin VTT:n julkaiseman Talonrakennuksen routasuojausohjeen mukaisesti. Roudan laskennallinen syvyys määritettiin Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin esittämällä menetelmällä, kuva 34. Laskennassa otetaan huomioon maa-ainesten jäähtymislämpö vuoden keskilämpötilasta 0 °C:een, maassa olevan veden jäätymisenergia sekä maan jäähtymislämpö 0 °C:sta pakkaskauden ilman keskilämpötilaan. (Kivikoski ym. 2007.)



Kuva 33. Lämpötilan jakautuminen roudan edetessä Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin mukaan. (Kivikoski ym. 2007)

Kerroksellisen rakenteen kunkin kerroksen jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä laskettiin kaavalla 8. Mitoituspakkasmäärästä vähennettiin päällysrakenteen jäätymiseen käytetty pakkasmäärä, jolloin saatiin pohjamaan jäätymiseen käytettävissä oleva pakkasmäärä. Lasketun pakkasmäärän ja kaavan 9 avulla voidaan laskea roudan paksuus pohjamaassa. (Kivikoski ym. 2007.)

$$F_n = q_n \cdot d_n \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \cdots + \frac{d_n}{2 \cdot \lambda_n} \right) \qquad (8)$$

$$d_n = -\lambda_n \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \sqrt{{\lambda_n}^2 \cdot \left(\cdot \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} \right)^2 + \frac{2 \cdot \lambda_n}{q_n} \cdot F_n} \qquad (9)$$

jossa,

q_n	on kerroksen jäätymiseen tarvittava lämpömäärä, Wh/m^2
d_i	on kerroksen paksuus, m
λ_i	on kerroksen lämmönjohtavuus W/mK
F_n	on kerroksen jäätymiseen kuluva pakkasmäärä h°C

Taulukossa 24 on esitetty roudan tunkeutumissyvyyslaskennan lähtötiedot. Materiaaliparametrit ovat peräisin Tiehallinnon julkaisusta Tierakenteen routamitoitus. (Saarelainen 2001)

Taulukko 24. Roudan tunkeutumissyvyyden laskennan lähtötiedot ja materiaaliparametrit. (Saarelainen, 2001)

Lähtötiedot		
Vuoden keskilämpötila, Tm	4	°C
Pakkaskauden keskiläpötilaTc	-7,8	°C
Mitoituspakkasmäärä	25000	h°C

Parametri	yksikkö	AB	Kantava	Jakava	XPS	Hiekka	Pohjamaa
Kuivatilavuuspaino	kN/m^3	24	22	21	0,36	18	16
Vesipitoisuus	paino-%	0,5	5	6	27	5	50
Lämmönjohtavuus	W/Km	2	2,4	2,4	0,05	1,3	2

Taulukossa 25 on esitetty roudan tunkeutumissyvyyden tulokset. XPS-rakenteen jäätymiseen tarvitaan vähemmän energiaa kuin InfraRYL-rakenteella. Eli käytettävä energia pohjamaan jäätymiseen on suurempi XPS-rakenteella kuin InfraRYL-rakenteella. Kuitenkin XPS-rakenteella pohjamaa jäätyy vain 0,11 m ja InfraRYL-rakenteella 0,43 m. Ero johtuu XPS kerroksen pienestä lämmönjohtavuudesta.

Taulukko 25. Roudan tunkeutumissyvyys.

Rakenne			**InfraRYL**		**XPS**	
Parametrit	**λf [W/mK]**	**q, Wh/m2**	d [m]	Pakkas-määrä h°C	d [m]	Pakkas-määrä h°C
Päällyste	2,0	5168	0,09	10	0,09	10
Kantavan kerroksen murske	2,4	14630	0,15	167	0,15	167
Jakavan kerroksen murske	2,8	16063	1,0	4595	0,25	611
XPS	0,050	1031	-	-	0,1	123
Kuivatuskerros hiekka	1,3	11970	-	-	0,1	2676
Pohjamaan jäätymiseen käytettävissä oleva pakkasmäärä, Kh				20227		21412
Jäätyvän pohjamaan paksuus, m				**0,43**		**0,11**
Roudan kokonaistunkeutumissyvyys, m				**1,67**		**0,80**

9.2 Routanousun määritys turpoamakertoimella

Routanousumitoitus tehtiin Tiehallinnon ohjetta soveltaen. Routanousu lasketaan kaavan 10 mukaan. (Tiehallinto, 2004)

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 - \ldots - a_n \cdot R_n) \cdot t / 100 \qquad (10)$$

jossa,

RN_{lask} on laskennallinen routanousu, mm
S on mitoitusroudansyvyys, mm
R_i on routimattoman kerroksen paksuus, mm
a_i on materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta, taulukko 28
t on alusrakenteen routaturpoamakerroin, %, taulukko 27

Tiehallinnon ohjeessa mitoitusroudan syvyys Eteläsuomen alueelle on 1,5 m, mikä vastaa noin 15 000 °Ch pakkasmäärää, taulukko 24. Mitoituspakkasmääräksi valittiin kuitenkin keskimäärin kerran 10 vuodessa toistuva pakkasmäärä, joka on noin 25 000 °Ch (Routavauriot ja routasuojaus ,RIL 193-1992). Tällöin taulukon 24 mukaan mitoitusroudansyvyydeksi tulee 1,9 m.

Taulukko 26. Tiehallinnon ohjeen mukaiset mitoitusroudansyvyys sekä mitoituspakkasmäärä. (Tiehallinto 2004)

Mitoitusroudan-syvyys S, mm	Mitoituspakkasmäärä F_{mit} , °Ch
2200	33611
2100	30625
2000	27778
1900	25069
1800	22500
1700	20069
1600	17778
1500	15625
1400	13611

Tiehallinnon ohjeessa pohjamaan routivuutta kuvataan turpoamakertoimella, jonka yksikkö on %. Turpoamakertoimen suuruuteen vaikuttavat maalajin ominaisuudet sekä kosteusolosuhteet. Turpoamakertoimen arvot vaihtelevat 0-16 % välillä. Taulukossa 25 on esitetty tämän työn kannalta oleelliset maalajit ja niiden turpoamakertoimien arvot.

Taulukko 27. Routaturpoamakertoimen riippuvuus maalajista ja kosteusolosuhteista. (Tiehallinto 2004)

Maalaji	Turpoamakerroin t, %	
	Kuivana	Märkänä
Si, SiMr, Sa/Si*	12	16
KuSa	-	6
Sa, Lj	-	6

*Kerrallinen savi/siltti (Sa/Si). Saven joukossa on ainakin paikoin silttikerroksia tai sitäkin karkeampia (vettä johtavia) kerroksia.

Tiehallinnon ohjeessa on taulukoitu eri materiaaleille eristävyyden vastaavuuskertoimet. Vertailumateriaalina toimii hiekka, jonka kerroin on yksi. XPS:sän eristävyysominaisuudet ovat 20-kertaiset hiekkaan nähden, joten sen kerroin on 20, taulukko 28.

Taulukko 28. Materiaalien eristävyyden vastaavuuskertoimet. (Tiehallinto 2004)

Kerrosmateriaali	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta, a_i
Hiekka	1,0
Bitumilla sidotut	1,0
Sora, murske	0,9
Louhe	0,8
Kuonamurske, kappalekuona	1,6
Kuonahiekka, masuunihiekka	1,7
Kevytsora	4
XPS*	20
EPS*	15

* Asennussyvyys 0,7 m, 0,15m kuivatuskerros levyn alla.

Taulukko 29. Laskennalliset routanousut InfraRYL rakenteelle sekä 50mm ja 100mm XPS-rakenteelle.

Turpoamakerroin, %	Routanousu, mm		
	InfraRYL	XPS 50 mm	XPS 100mm
6	41	21	0
12	81	42	0
16	124	56	0

Taulukosta 29 nähdään, että 50 mm XPS - levypaksuudella ei vielä saada aikaiseksi täysin routimatonta rakennetta. Pelkästään 50 mm paksu XPS-levy puolittaa laskennallisen routanousun suhteessa InfraRYL-rakenteeseen. Sen sijaa 100 mm levypaksuudella ei laskennallista routanousua ole. Tästä voidaan päätellä, että XPS-rakenne on käytännössä routimaton ja näin ollen voidaan roudan vaikutukset pohjamaahan jättää huomioimatta.

10 Johtopäätökset

Kirjallisuusselvityksen ja tehtyjen laskelmien perusteella XPS soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin käytettäväksi katurakenteessa. Työssä käytetyn kaksiulotteisen elementtimenetelmän tuomat edut päällysrakenteen mitoituksessa rajoittuvat vain liikennekuormituksesta aiheutuvien muodonmuutosten tarkempaan määrittämiseen. Kriittisimmäksi kuormituskestävyysmitoituksessa XPS-rakenteella osoittautui pohjamaan muodonmuutos.

Pohjamaan kestoikä-funktioihin tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska samaa kestoikä-funktiota käytetään savelle ja hiekalle. Näiden maalajien väsymismekanismit eroavat kuitenkin toisistaan huomattavasti. Savella liikennekuormituksesta aiheutuva nopea kuormitus siirtyy lähes kokonaan huokosvedenpaineelle, kun taas hiekalla ne siirtyvät rakeiden välisiksi jännityksiksi. Toistuvan kuormituksen aiheuttamaa deformaatiota ei tulisi savella laskea yhden staattisen kuormituksen perusteella. Kappaleessa 3.2.5 esitettyjen pohjamaan kestoikä-funktioiden välillä on huomattavia eroja, mikä viittaisi siihen, että niiden virhemarginaali on suuri. Kirjallisuudesta ei löytynyt viitteitä siitä, että savelle olisi tehty dynaamisia toistokuormituskokeita muodonmuutosten määrittämiseksi. Vaikuttaisi, että saven kestoikäfunktiot ovat kokemusperäisesti määritettyjä.

Taulukossa 30 on vertailtu elementti- ja monikerrosmenetelmällä laskettuja suhteellisia muodonmuutoksia. Taulukossa PLAXIS 1 tarkoittaa ensimmäistä kuormituskertaa ja PLAXIS 5 viidettä kuormituskertaa. Elementtimenetelmällä lasketut ensimmäisen kuormituksen muodonmuutokset olivat huomattavasti suurempia kuin viidennen toistokuormituksen muodonmuutokset. APAS ohjelmalla lasketut muodonmuutokset olivat vähän pienempiä kuin elementtimenetelmällä lasketut ensimmäisen kuormituksen muodonmuutokset. Elementtimenetelmällä laskettujen muodonmuutosten pieneneminen kuormituskerojen lisääntyessä johtuu käytetystä myötölujittuvasta materiaalimallista. Elementtimenetelmällä saatuihin tuloksiin täytyy kuitenkin suhtautua varauksella, koska toistokuormitusten käytöstä päällysrakenteen mitoituksessa ei ole aikaisempia kokemuksia.

Taulukko 30. APAS- ja PLAXIS mitoituksen vertailu.

Rakenne	InfaRYL			XPS		
Kerros	APAS	PLAXIS 1	PLAXIS 5	APAS	PLAXIS 1	PLAXIS 5
AB, ε_x , µS	299	330	170	330	462	180
Kantava, ε_y , µS	983	1240	800	1006	1240	770
Jakava, ε_y , µS	789	925	480	838	1300	400
XPS, σ_y, Kpa	-	-	-	15	28	42
Hiekka, ε_y , µS	-	-	-	548	134	104
Pohjamaa, ε_y , µS	380	320	305	1297	1700	830

Laskelmien perusteella ei olisi suositeltavaa käyttää ohennettua XPS- rakennetta kohteissa, joissa päällysrakenne tehtäisiin suoraan pehmeän saven päälle. Kuitenkin kohteeseen, jossa XPS- rakenne perustettaisiin yli 200 mm paksun kuivakuorisavikerroksen varaan, ei katuluokassa 4 pitäisi aiheutua merkittävää pohjamaan deformoitumista. Kuivakuorisavi on ylikonsolidoitunutta, eikä liikennekuormasta aiheutuva noin 13 kPa kuormanlisäys pitäisi aiheuttaa siinä leikkausmuodonmuutoksia.

Saneerauskohteessa voidaan vanhan kadun pinnalta tehdä maatutkaluotauksia ja tutkia kadun vaurioitumismekanismia. Kun olevat rakennekerrokset ja urautumismekanismi ja suuruus tiedetään, voidaan XPS-rakenteen soveltuvuus kohteeseen arvioida.

Painumamitoituksen perusteella ohennetun rakenteen käyttö on suositeltavaa varsinkin saneerauskohteissa pehmeillä savikoilla. Uudisrakentamisessa voidaan katu perustaa esimerkiksi pilaristabiloinnin varaan, mutta saneerauskohteissa stabiloiminen on hankalaa. InfraRYLin mukaisen rakenteen tekeminen savikoilla ilman pohjanvahvistusta johtaa kadun painumiseen.

Mitoitus on tehty 100 mm paksulle XPS-levylle. Levyn paksuntamiselle, kevennystarpeen ollessa suuri, ei ole esteitä kunhan alle tehdään kunnollinen kuivatuskerros sekä tarkistetaan nosteen vaikutus.

Routivilla alusrakenteilla sulamispehmenemisen aikana tapahtuvat alusrakenteen deformaatiot ovat huomattavasti suurempia kuin muina vuodenaikoina tapahtuva deformoituminen. Routalaskelmien perusteella voidaan olettaa, että 100 mm paksu XPS-levy estää alusrakenteen routimisen. Tätä ei kuitenkaan ole kuormituskestävyysmitoituksessa otettu huomioon. Alusrakenteen deformoituminen XPS-rakenteella ei välttämättä ole niin merkittävää, kuin laskenta antaa ymmärtää.

XPS-rakenteen käytön edut

Saneerauskohteessa ohuemman päällysrakenteen rakentaminen on työteknisesti helpompaa ja nopeampaa, jolloin siitä aiheutuu vähemmän haittaa myös kadun käyttäjille. Rakentaminen helpottuu, mikäli kaivu ei ulotu kuivakuorisaven alapuolelle. Varsinkin pääkaupunkiseudulla lisäarvoa tuo rakenteen ohuus, kun kaivettavat, siirrettävät ja läjitettävät massat pienenevät.

Rakenteesta aiheutuva kuormitus maaperään on pienempi, jolloin kadun painumat ovat vähäisempiä. Lähes routimaton XPS-rakenne tasaa kadulle tyypillistä alusrakenteen epätasalaatuisuutta sekä vähentää siirtymärakenteiden tarvetta routanousuerojen tasaamiseksi. Erittäin routivilla kerrallisilla savilla ja silteillä XPS-levyn ansiosta alusrakenne ei roudi.

XPS-rakenteen käytön haitat

XPS levyn päälle rakennettavien kerrosten tiivistettävyydestä optimitiiveyteen ei ole varmuutta, jolloin sitomattomien kerrosten deformaatiot kasvavat. XPS materiaalina ei ole yhtä pitkäikäinen kuin murske. Nykyisillä käytössä olevilla laskentamenetelmillä mitoitettaessa XPS-rakenteen kestoikä ei ole riittävä. Päällysteeseen voi otollisissa olosuhteissa myös muodostua mustaa jäätä, jolloin odottamaton liukkaus on liikenneturvallisuusriski.

Ohennettu rakenne pienentää mahdollisesti kadun alla olevien kunnallisteknisten putkien ja johtojen peitesyvyyttä. XPS-kerros todennäköisesti joudutaan uusimaan, mikäli kadun rakenteet kaivetaan auki huoltotöiden tai uusien tonttiliittymien takia.

Rajoitukset

Rakennetta ei tule käyttää kaduilla, joissa raskaan liikenteen määrä on suuri, ainakaan ilman lisätutkimuksia. Rakenteen käytössä tulee suunnittelijan olla tietoinen liikenne-

kuormituksen aiheuttamasta pohjamaan deformoitumisriskistä sekä eristeen aiheuttamasta liukkausvaarasta.

Suositukset ja jatkotutkimukset

Rakenteen ominaisuudet tulevat parhaiten hyödynnetyksi saneerauskohteissa, joissa savikon paksuus on suuri eikä pohjanvahvistustoimenpiteitä voida tehdä tai niiden kustannukset nousevat hyvin suuriksi.

Ennen laajamittaista käyttöä tulisi esimerkiksi tehdä yksi kadun osa koerakenteeksi. Koerakentamisella tulisi testata XPS-levyn päälle rakennettavien kerrosten tiivistettävyys sekä tiivistysmenetelmien soveltuvuus. Koerakenteen perusteella laaditaan laadunvalvontaohjeet. Koerakenteeseen olisi hyvä asentaa eri lujuusluokan XPS-levyjä, jotta jäykkyyden vaikutus tiivistettävyyteen sekä lopullisen rakenteen toimivuuteen saadaan selvitettyä.

Koerakenteen instrumentointi on kallista ja mitattavat suureet niin pieniä, että tulosten hyödynnettävyys on kyseenalaista. Rakenteen kaivaminen auki muutaman vuoden kuluttua rakentamisesta voi tulla kyseeseen, mikäli havaitaan päällysrakenteessa urautumista. Urautumisen syyn selvittäminen on oleellinen tieto rakenteen toimivuuden arvioimiselle sekä kehittämiselle.

Päällysrakenteen mitoituksessa pitäisi siirtyä uudelle aikakaudelle ja hyödyntää mallinnuksen ja tietotekniikan tuomat hyödyt. Staattisen kuorman alaisena määritytetyistä muodonmuutoksista ja empiirisistä kestoikäfunktiosta ”ennustaminen” tulisi vaihtaa tarkempiin simulaatioihin. Erityisesti saven pysyvien muodonmuutosten syntymistä liikennekuormituksen vaikutuksesta tulisi tutkia lisää. Päällysrakenteen väsymisen pitäisi perustua fysikaalisiin materiaalimalleihin ja simulaatioihin, missä yksinkertaistuksia ei tarvitsisi tehdä. Nykyiset menetelmät nojaavat liikaa empiiriseen tieteeseen, jolloin poikkeavien rakenteiden mitoitus ei onnistu.

Lähdeluettelo

APAS_3 Mitoitusohjelman käyttöohje 2004. Tiehallinto

Belt, J., Kolisoja, P., Alatyppö, V. & Valtonen, J. 2006. Tierakenteen rappeutuminen ja kunnon ennustaminen. Julkaisu n:o 2. [Verkkojulkaisu]. 43 s. [Viitattu 1.12.2011]. Saatavissa:http://herkules.oulu.fi/isbn9514280520/isbn9514280520.pdf

Belt, J., Lämsä, V.P., Ehrola, E. 2000. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Tiehallinnon selvityksiä 60/2000. Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.P., Savolainen, M., Ehrola, E. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki.

Doré, G. & Zubeck, H.K 2009. Cold regions pavement engineering. ASCE, USA. 416 s. ISBN 978-0-07-160088-4

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki.

FINNFOAM 2012. FINNFOAM Oy:n kotisivut. www.finnfoam.fi. [Viitattu 1.3.2012]

Hentilä, V., Slunga, E. & Palolahti, A. 1994. Roudan vaikutusten mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 8/1994. Helsinki 1994. TIEL 3200219. s.81+30

InfraRYL 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1 Väylät ja alueet. Rakennustieto Oy. Helsinki. ISBN 978-951-682-958-9

Kivikoski, H., Juvankoski, M. & Saarelainen, S. 2007. Talonrakennuksen routasuojausohjeet. VTT ja Rakennustieto. Tampere 96 s. ISBN 978-951-682-851-3

Kivikoski, H. & Saarelainen, S. 2001. Tierakenteen Routamitoitus, Menetelmäkuvaus. Tiehallinto/VTT. 44s.

Korkiala-Tanttu, L. 2008. Calculation method for permanent deformations of unbound pavement materials. VTT. Finland. 92 + 84 s. ISBN 978-951-38-7135-2

Laaksonen, R., Kivikoski, H., Pienimäki, M., Korkiala-Tanttu, L., Törnqvist, J. 2005. Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa. Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004. Helsinki.

Lehtonen, K. 2009. Tien ja kadun rakenteet ja rakentaminen L. Opetusmoniste. Espoo

Länsivaara, T. 2000. Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Tielaitoksen selvityksiä 44/2000. Tiehallinto, Tie- ja tieliikennetekniikka, Helsinki 2000. TIEL 3200630. 44 s.

Nykänen, S. Polystyreeni. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.2.2012]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf

PANK ry. 2011. Asfalttinormit 2011. Päällystealan neuvottelukunta.

Petäjä, S. & Spoof, H. 2001. Päällysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi. TPPT20 Menetelmäkuvaus. Espoo, VTT Rakennus – ja yhdyskuntatekniikka. 43s. + liitteet 4s.

PLAXIS 2011. Material Models Manual. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: http://www.plaxis.nl/files/files/2D2011-1-Tutorial.pdf

Rahiala, J. 1988. Maabetoni ja betonipäällysteet…käytössä maailmalla sopivatko Suomeen?...Rakennusaineteollisuusyhdistys. Tie- ja vesirakennushallitus. Betoniprojekti. Turku.

RIL 95 Pohjarakennus 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. K. J Gummerus Oy, Jyväskylä 1974. ISBN 951-758-003-7

Rodway B. & Wardle L.J. 1998. Layered elastic design of heavy duty and industrial pavements. AAPA Pavements Industry Conference, Australia 1998.[Verkkoartikkeli]. [Viitattu 5.3.2012]. Saatavissa: http://www.mincad.com.au/AAPA98/AAPA98f.htm

Saarelainen, S. 2000. Tierakenteen routamitoitus. Tiehallinto, TPPT Menetelmäkuvaus18.

Saarelainen, S. 2003. Paksun EPS-kerroksen kuormituskestävyys. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Sisäinen raportti RTE50-IRI14/2003. [Verkkojulkaisu]. 79 s. [Viitattu 15.1.2012]. Saatavissa: http://www.eps-eriste.fi/doc/Loppurap_RTE50-IR-14_2003.pdf

Tiehallinto 2004. Tierakenteen suunnittelu. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki 2004. 69 s. ISBN 951-803-402-8

Unhola, T. 2004. Nastarenkaiden kuluttavuus. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 72/2004. Helsinki

Wikipedia. Polystyreeni. [Artikkeli]. [Viitattu 10.2.2012]. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Polystyreeni

Wood, D.M 1990. Soil behavior and critical state soil mechanics. Cambridge University, Australia. 462 s. ISBN 0-521-33782-8

Haastettelut:

Asso Erävuoma 14.3.2012. Markkinointipäällikkö, FINNFOAM Oy.

Henri Nieminen 14.3.2012. Toimitusjohtaja / Kehityspäällikkö, FINNFOAM Oy.

LIITE 1

APAS laskennassa käytetyt moduulit.

InfraRYL

Kerros	Kerroksen paksuus, mm	Syvyys asfaltin pinnasta, mm	Poissonin luku	E-moduuli, MPa
Asfaltti AB(B70/100)	40	40	0,35	3650
Asfaltti AB(B50/70)	50	90	0,35	4175
Kantavan kerroksen murske	50	140	0,35	336
Kantavan kerroksen murske	50	190	0,35	306
Kantavan kerroksen murske	50	240	0,35	284
Jakavan kerroksen murske	50	290	0,35	191
Jakavan kerroksen murske	50	340	0,35	181
Jakavan kerroksen murske	100	440	0,35	168
Jakavan kerroksen murske	100	540	0,35	155
Jakavan kerroksen murske	100	640	0,35	146
Jakavan kerroksen murske	100	740	0,35	139
Jakavan kerroksen murske	100	840	0,35	133
Jakavan kerroksen murske	100	940	0,35	130
Jakavan kerroksen murske	100	1040	0,35	127
Jakavan kerroksen murske	100	1140	0,35	126
Jakavan kerroksen murske	100	1240	0,35	127
Pohjamaa		-	0,35	5

XPS

Kerros	Kerroksen paksuus, mm	Syvyys asfaltin pinnasta, mm	Poissonin luku	E-moduuli, MPa
Asfaltti AB(B70/100)	40	40	0,35	3650
Asfaltti AB(B50/70)	50	90	0,35	4175
Kantavan kerroksen murske	50	140	0,35	324
Kantavan kerroksen murske	50	190	0,35	296
Kantavan kerroksen murske	50	240	0,35	270
Jakavan kerroksen murske	50	290	0,35	177
Jakavan kerroksen murske	50	340	0,35	163
Jakavan kerroksen murske	50	390	0,35	149
Jakavan kerroksen murske	50	440	0,35	138
Jakavan kerroksen murske	50	490	0,35	129
XPS	50	540	0,38	24
XPS	50	590	0,38	24
Hiekka	50	640	0,35	50
Hiekka	50	690	0,35	50
Pohjamaa		-	0,35	5